



**KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK
DAERAH RESAPAN MATA AIR DI KECAMATAN
NGANTANG UNTUK MEMAKSIMALKAN DEBIT**

DISERTASI

Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Doktor



Oleh:

TITUT YULISTYARINI
NIM. 0730401057

PROGRAM DOKTOR ILMU PERTANIAN
MINAT ILMU TANAH DAN PENGELOLAAN SUMBERDAYA LAHAN

PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2012

**KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK
DAERAH RESAPAN MATA AIR DI KECAMATAN
NGANTANG UNTUK MEMAKSIMALKAN DEBIT**

DISERTASI

**Untuk Memenuhi Persyaratan
Mencapai Gelar Doktor**



Oleh:

TITUT YULISTYARINI
NIM. 0730401057

**PROGRAM DOKTOR ILMU PERTANIAN
MINAT ILMU TANAH DAN PENGELOLAAN SUMBERDAYA LAHAN**

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2012**

DISERTASI

**KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK
DAERAH RESAPAN MATA AIR DI KECAMATAN NGANTANG
UNTUK MEMAKSIMALKAN DEBIT**

Oleh :
TITUT YULISTYARINI

Dipertahankan di depan penguji
Pada tanggal : 20 Februari 2012
Dan dinyatakan memenuhi syarat

Komisi Penasehat,



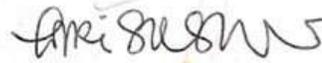
Prof. Dr. Ir. Zaenal Kusuma, MS

Promotor



Prof. Dr. Ir. Soemarno, MS

Ko-Promotor 1



Dr. Endang Ariesoesilaningsih

Ko-Promotor 2

Malang,

Universitas Brawijaya
Program Pascasarjana Fakultas Pertanian
Dekan,



Prof. Ir. Sumardi Ashari, M.Agr.Sc., Ph.D.
NIP. 19530328 198103 1 001





PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah DISERTASI ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia DISERTASI ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (DOKTOR) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Malang, 20 Februari 2012

Mahasiswa,



Nama :Titut Yulistyarini
NIM :0730401057....
PS :Program Doktor Ilmu Pertanian
PPSFP-UB

JUDUL DISERTASI:

**KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK
DAERAH RESAPAN MATA AIR DI KECAMATAN NGANTANG
UNTUK MEMAKSIMALKAN DEBIT**

Nama Mahasiswa : Titut Yulistyarini
NIM : 0730401057
Program Studi : Ilmu Pertanian
Minat : Ilmu Tanah dan Pengelolaan Sumberdaya Lahan

KOMISI PROMOTOR

Promotor : Prof.Dr.Ir. Zaenal Kusuma, SU
Ko-Promotor : Prof.Dr.Ir. Soemarno, MS
Ko-Promotor : Dr. Endang Arisoesilaningih

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Adi Susilo, Ph.D
Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. Arief Rachmansyah
Dosen Penguji 3 : Dr.Ir. Sudarto, MS
Dosen Penguji Tamu : Dr. R.Hendrian

Tanggal Ujian : 20 Februari 2012

RINGKASAN

TITUT YULISTYARINI: KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK DAERAH RESAPAN MATA AIR DI KECAMATAN NGANTANG UNTUK MEMAKSIMALKAN DEBIT. Promotor: Zaenal Kusuma; Ko Promotor 1: Soemarno; Ko Promotor 2: Endang Arisoesilaningih

Penurunan debit akibat rusaknya ekosistem di daerah resapan mata air perlu mendapatkan perhatian. Sebanyak 63,38% mata air di Kecamatan Ngantang mengalami penurunan debit hingga lebih dari 50% di musim kemarau, bahkan beberapa di antaranya mengering. Konservasi debit mata air perlu segera dilakukan untuk menciptakan ekosistem lebih stabil, sehingga fungsi hidrologis ekosistem daerah resapan mata air dapat optimal. Untuk itu, perlu dilakukan kajian mengenai hubungan antara karakteristik vegetasi dan biogeohidrofisik daerah resapan dengan debit mata air. Tujuan penelitian ini adalah: 1) Mengetahui karakteristik hidrogeomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat; 2) Mengetahui karakteristik daerah resapan ketiga mata air berdasar kondisi lahan, biogeohidrofisik dan vegetasinya; 3) Eksplorasi hubungan antara karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan dengan debit mata air; 4) Menemukan model perbaikan daerah resapan untuk memaksimalkan debit mata air. Metode penelitian dengan studi literatur, survey langsung dan analisis data secara deskriptif, ANOVA, Analisis Multivariate *Partial Least Square* (PLS) dan Analisis *Response Surface*. Hasil identifikasi dan karakterisasi mata air menunjukkan bahwa akuifer ketiga mata air berupa batu pasir yang tidak terkonsolidasi, merupakan akuifer dangkal dengan kedalaman 0,32-1,7 m dan ketebalan mencapai 0,84 – 12,59 m. Mata air Krisik memiliki ketebalan akuifer tertinggi dan kedalaman terendah dibandingkan dengan mata air Complang dan Pusung pegat. Ketiga mata air termasuk mata air berdebit kecil dan berfluktuasi, dimana fluktuasi debit mata air Krisik tidak sebesar mata air Complang dan Pusung pegat. Debit mata air Krisik mengalami penurunan, tetapi tidak sampai mengering. Sedangkan debit mata air Complang dan Pusung pegat mengering hingga 1- 4 bulan. Hasil penelitian karakterisasi biofisik daerah resapan mata air menunjukkan biofisik tanah di mata air Krisik hampir sama dengan mata air Pusung pegat dan lebih baik dari Complang. Meskipun C-organik dan kemantapan agregatnya lebih rendah dari Pusung pegat, namun tanah di daerah resapan mata air Krisik memiliki porositas lebih tinggi dan tanah lebih ringan (BI tanah lebih rendah). Konduktivitas Hidroulik Jenuh di daerah resapan mata air Krisik dan Pusung pegat tergolong sangat cepat. Daerah resapan mata air Krisik memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas dan penutupan kanopi tertinggi, namun kerapatan pohon, belta dan tumbuhan bawah serta C-stock terendah. Jenis pohon yang mendominasi daerah resapan mata air Krisik dan Pusung pegat sama yaitu pinus (*Pinus merkusii*), durian (*Durio zibethinus*) dan sengon laut (*Albizia falcataria*). Sedangkan mata air Complang didominasi oleh pohon durian (*D. zibethinus*), sengon laut (*A. falcataria*) dan kelapa (*Cocos nucifera*). Jenis belta yang mendominasi ketiga daerah resapan mata air sama, yaitu kopi robusta (*Coffea canephora* var. robusta), sengon laut (*A. falcataria*), kopi liberika (*C. liberica*) dan pisang (*Musa paradisiaca*). Kecepatan infiltrasi dan simpanan air





tanah di mata air Krisik juga lebih tinggi dibandingkan dua mata air lainnya. Hasil penelitian ke tiga menunjukkan bahwa debit mata air secara langsung dipengaruhi karakteristik vegetasi, geofisik, biofisik tanah dan hidrologi. Karakteristik vegetasi, yang diindikasikan oleh kerapatan belta berpengaruh paling nyata dan negatif terhadap debit mata air, dimana semakin rapat jenis belta maka debit semakin rendah. Model *PLS* ini memiliki nilai *predictive relevance Q²* sebesar 100%, sehingga model layak digunakan dan memiliki nilai prediktif yang sangat relevan. Berdasarkan analisis *Response Surface* diketahui maksimalisasi debit mata air sebesar 0,48 l.detik⁻¹ akan tercapai pada kedalaman akuifer 0,93 m. Kedalaman akuifer tersebut diperoleh dari kecepatan infiltrasi maksimal sebesar 51,16 cm.jam⁻¹. Maksimalisasi kecepatan infiltrasi dilakukan dengan mempertahankan C-organik tanah tertinggi sebesar 0,98% dan meminimalkan kerapatan belta hingga 76.757 individu per 24,48 ha. Upaya penambahan C-organik tanah bisa dilakukan dengan meningkatkan diversitas tanaman lokal yang bernilai ekologi dan ekonomi, seperti sukun (*Artocarpus altilis*), nangka (*A. heterophyllus*), cempaka (*Michelia champaca*), kemiri (*Aleurites moluccana*), jambu (*Syzigium spp.*) dan jenis-jenis bambu.

Kata kunci: mata air, vegetasi, biogeohidrofisik, maksimalisasi, debit

SUMMARY

TITUT YULISTYARINI: VEGETATION AND BIOGEOHYDROPHYSIC CHARACTERISTICS OF SPRING'S RECHARGE AREA IN NGANTANG DISTRICT TO MAXIMIZE ITS DEBIT. Promotor: Zaenal Kusuma, Co Promotor 1: Soemarno; Co Promotor 2: Endang Arisoesilaningsih

Decreasing spring discharge frequently caused by ecosystem degradation. It was reported that 63.38% of Ngantang District springs decreased their debit by 50%, and some even dried out. Conservation of recharge area needs to be carried out to create a more stable ecosystem. This would optimize hydrological function of the ecosystem in spring's recharge area. A study on the relationship between spring's debit and the recharge area's characteristic vegetation and biogeohydrophysic was carried out. The aims of this study are: 1) Identification and characterization of three Ngantang springs namely Krisik, Complang and Pusung Pegat; 2) Characterization of the three recharge area based on land, biogeohydrophysic and vegetation characteristics; 3) Exploration of the relationship among land, biogeohydrophysic and vegetation characteristics in three spring's recharge areas; 4) Designing model of improved spring's recharge area to maximize its debit.

The methods used were literature study, data survey and descriptive analysis, ANOVA, Analysis of Multivariate Partial Least Square (PLS) and Response Surface Analysis. The results of spring characterization indicated that aquifer of three springs was composed by unconsolidated sand stone, a shallow aquifer of 0.32 – 1.7 m depth and 0.84 – 12.59 m thick. Krisik spring showed the thickest but shallowest aquifer compared to those of Complang and Pusung Pegat springs. All three springs showed a small and fluctuating debit, but Krisik expressed the lowest fluctuation. Krisik spring's debit decreased, but not completely dried up, whereas Complang and Pusung Pegat were dried up to 1-4 months. Biophysical characterization of spring recharge areas showed that the soil of Krisik spring's recharge area was biophysically similar to that of Pusung Pegat spring, but better than was Complang one. Although the C-organic and aggregate stability were lower than in Pusung Pegat, but soil of Krisik was higher porosity and lower bulk density. Moreover, the Saturated Hydraulic Conductivity of Krisik and Pusung Pegat recharge areas was considered to be very fast. Recharge area of Krisik springs showed highest Quality Biodiversity Index and canopy coverage, but the lowest density of trees, sapling or poles and ground cover species as well as C-stock. Based on the PLS model, it was showed that springs debit directly influenced the characteristics of vegetation, geophysical, soil biophysical and hydrology. The characteristics of vegetation influenced negatively to spring debit, where the higher density of sapling or poles decreased spring debit. Predictive value of relevance (Q^2) of the model was 100%, therefore the model was fit and showed a very relevant predictive value. Based on result of Response Surface Analyses, to maximize spring debit toward $0.48 \text{ l.second}^{-1}$ the aquifer depth should be 0.93 m. This depth of aquifer was achieved if the maximum infiltration rate was $51.16 \text{ cm.hour}^{-1}$. The maximum infiltration rate was achieved by maintaining the 0.98 % Soil Organic Carbon (SOC) and minimizing the



density of saplings and poles to 76,757 individuals per 24.48 hectare. The higher SOC could be achieved by increasing the diversity of local plants that have ecology and economic values, such as breadfruit (*Artocarpus altilis*), jackfruit (*A. heterophyllus*), *Michelia champaca*, *Aleurites moluccana*, *Syzigium spp.* and bamboo species.

Key words: *spring, vegetation, biogeohydrophyisic, maximize , debit*



DAFTAR ISI

No.	Teks	Hal.
	JUDUL	
	LEMBAR PENGESAHAN	
	PERNYATAAN ORISINALITAS	
	DAFTAR RIWAYAT HIDUP	
	RINGKASAN	i
	SUMMARY	iii
	KATA PENGANTAR	v
	DAFTAR ISI	vi
	DAFTAR TABEL	ix
	DAFTAR GAMBAR	x
	DAFTAR LAMPIRAN	xiii
	GLOSSARY	xiv
	DAFTAR SINGKATAN	xvi
I	PENDAHULUAN	
	1.1. Latar belakang	1
	1.2. Perumusan masalah	3
	1.3. Tujuan penelitian	4
	1.4. Manfaat penelitian	4
	1.5. Kerangka pemikiran penelitian	6
II	TINJAUAN PUSTAKA	
	2.1. Keterkaitan Siklus Hidrologi, Air Tanah dan Mata air	7
	2.2. Karakter dan Distribusi Mata Air	9
	2.3. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Debit Mata Air	13
	2.3.1. Iklim (Curah Hujan)	16
	2.3.2. Vegetasi	17
	2.3.3. Karakteristik biofisik tanah	21
	2.3.4. Karakteristik hidrologi	24
	2.3.4. Karakteristik geofisik	25
	2.4. Pentingnya Pemilihan Jenis Tumbuhan untuk Reboisasi	29
	2.5. Analisis <i>Partial Least Square (PLS)</i>	32
III	METODE PENELITIAN	
	3.1. Tempat dan Waktu penelitian	38
	3.2. Alat dan Bahan	41
	3.3. Kondisi Umum Lokasi Penelitian	
	3.3.1. Kondisi Iklim	41
	3.3.2. Geologi dan Hidrogeologi	42
	3.3.3. Geomorfologi (bentuk lahan dan kelerengan)	45
	3.3.4. Jenis Tanah	45
	3.3.5. Sejarah Penggunaan Lahan di Kecamatan Ngantang	46
	3.4. Pelaksanaan Penelitian	
	3.4.1. Identifikasi dan karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat	46



- 3.4.2. Karakterisasi Daerah Resapan Mata Air : Lahan, Biogeohidrofisik dan Vegetasi Mata Air Krisik, Complang dan Pusung Pegat
- 3.4.2.1. Karakterisasi Lahan 47
- 3.4.2.2. Karakterisasi Geofisik 47
- 3.4.2.3. Karakterisasi Biofisik tanah 47
- 3.4.2.4. Karakterisasi Vegetasi 48
- 3.4.2.5. Karakterisasi Hidrologi 49
- 3.4.3. Eksplorasi hubungan karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan mata air dengan Analisis Multivariate (*Partial Least Square/ PLS*) 50
- 3.4.4. Maksimalisasi debit mata air berdasarkan optimalisasi karakteristik vegetasi dan biogeohidrofisik daerah resapannya dengan *Response Surface Analysis* 51

IV. IDENTIFIKASI DAN KARAKTERISASI MATA AIR KRISIK, COMPLANG DAN PUSUNG PEGAT

- 4.1. Pendahuluan 52
- 4.2. Metode Penelitian 55
- 4.3. Hasil dan Pembahasan
- 4.3.1. Karakteristik Morfologi Mata Air Krisik, Complang dan Pusung pegat 58
- 4.3.2. Karakteristik Mata Air Berdasarkan Struktur Lapisan Bawah Permukaan
- 4.3.2.1. Interpretasi model 1D dan 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik 59
- 4.3.2.2. Interpretasi model 1D dan 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang 60
- 4.3.2.3. Interpretasi model 1D dan 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Pusung pegat 63
- 4.3.3. Karakteristik Mata Air Berdasar Debit dan Hubungan Debit dengan Curah Hujan 71
- 4.4. Kesimpulan 76

V. KARAKTERISASI DAERAH RESAPAN MATA AIR : LAHAN, BIOGEOHIDROFISIK DAN VEGETASI MATA AIR KRISIK, COMPLANG DAN PUSUNG PEGAT

- 5.1. Pendahuluan 77
- 5.2. Metode Penelitian 79
- 5.3. Hasil dan Pembahasan
- 5.3.1. Delineasi daerah resapan 84
- 5.3.2. Karakteristik Lahan 86
- 5.3.3. Karakteristik Geofisik 89
- 5.3.4. Karakteristik Biofisik tanah
- 5.3.4.1. Karakteristik biofisik tanah antara SPL-SPL di tiap daerah resapan mata air Mata Air Krisik, Complang dan Pusung pegat 89



5.3.4.2.	Karakteristik biofisik tanah di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat	98
5.3.5.	Karakteristik Vegetasi	
5.3.5.1.	Karakteristik vegetasi pada tiap SPL di masing-masing daerah resapan mata air	109
5.3.5.2.	Karakteristik vegetasi di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat	117
5.3.6.	Karakteristik Hidrologi	
5.3.6.1.	Kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah antara SPL-SPL di tiap daerah resapan mata air	119
5.3.6.2.	Kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat	121
5.4.	Kesimpulan	122
VI.	EKSPLORASI HUBUNGAN KARAKTERISTIK LAHAN, BIOGEOHIDROFISIK DAN VEGETASI DI DAERAH RESAPAN MATA AIR DENGAN ANALISIS MULTIVARIATE (<i>PARTIAL LEAST SQUARE/PLS</i>)	124
6.1.	Pendahuluan	124
6.2.	Metode Penelitian	126
6.3.	Hasil dan Pembahasan	128
6.4.	Kesimpulan	139
VII.	MAKSIMALISASI DEBIT MATA AIR BERDASARKAN OPTIMALISASI KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK DAERAH RESAPANNYA DENGAN <i>RESPONSE SURFACE ANALYSIS</i>	
7.1.	Pendahuluan	140
7.2.	Metode Penelitian	141
7.3.	Hasil dan Pembahasan	
7.3.1.	Perbaikan Model PLS	142
7.3.2.	Hasil optimalisasi debit mata air dan karakteristik daerah resapan dengan Analisis <i>Response Surface</i>	150
7.3.3.	Maksimalisasi debit mata air berdasarkan optimalisasi karakteristik daerah resapan	150
7.4.	Kesimpulan	151
VIII.	PEMBAHASAN UMUM	152
IX.	KESIMPULAN DAN SARAN	
9.1.	Kesimpulan	159
9.2.	Saran	159
	DAFTAR PUSTAKA	160
	LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Teks	Hal.
1.	Klasifikasi mata air berdasarkan debit (Meinzer, dalam Todd and Mays, 2005)	10
2.	Tekstur, struktur dan konduktivitas hidroulik jenuh (Landon, 1984)	24
3.	Nilai dan kelas konduktivitas hidroulik jenuh (Landon, 1984)	24
4.	Porositas beberapa bahan sedimen (Todd and Mays, 2005)	28
5.	Tiga mata air berdebit kecil di Kecamatan Ngantang	38
6.	Karakteristik biofisik tanah dan metode analisisnya	48
7.	Karakteristik mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat di Kecamatan Ngantang	55
8.	Hasil interpretasi 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik	61
9.	Hasil interpretasi 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang	64
10.	Hasil interpretasi satu dimensi lapisan bawah permukaan tanah hingga kedalaman 25 m di mata air Pusung pegat	66
11.	Hasil identifikasi dan karakterisasi hidrogeomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat	80
12.	Persamaan allometrik yang digunakan untuk menghitung biomassa pohon	83
13.	Lokasi dan jumlah plot contoh analisis kualitas tumbuhan pada masing-masing SPL di daerah resapan tiga mata air	83
14.	SPL pada daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat beserta luas masing-masing SPL	85
15.	Sistem Penggunaan Lahan (SPL) dan definisinya	85
16.	Kelerengan tiap SPL di masing-masing daerah resapan	87
17.	Jenis-jenis indikator beserta waktu pengumpulannya	127
18.	Nilai R^2 dan <i>Goodness of Fit Model</i>	132
19.	Hasil Pengujian Asumsi Linieritas	134
20.	Hasil Pengujian Hipotesis dalam Inner Model Hubungan Variabel Geofisik, Lahan, Karakteristik vegetasi, Biofisik tanah, Hidrologi, Curah Hujan dan Debit	135
21.	Nilai R^2 dan <i>Goodness of Fit Reduced Model</i>	143
22.	Hasil Pengujian Asumsi Linieritas	144
23.	Hasil Pengujian Hipotesis dalam Inner Model (Pengaruh Langsung)	145
24.	Hasil Pengujian Hipotesis dalam Inner Model (Pengaruh langsung dan tidak langsung)	147
25.	Karakteristik Lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat	154

DAFTAR GAMBAR

No.	Teks	Hal.
1.	Kerangka Pemikiran Penelitian	6
2.	Skematis suatu Siklus Hidrologi (Freeze, 1974 dalam Sophocleuous, 2003)	7
3.	Skema irisan melintang yang menggambarkan akuifer tertekan dan tidak tertekan (kiri) dan keberadaan air tanah (<i>Brown et al.</i> , 1972)	8
4.	Tipe-tipe mata air berdasarkan kondisi hidrogeologinya (Sada <i>et al.</i> , 2001 dalam <i>Brown et al.</i> (2007)	11
5.	Diagram konsep yang menunjukkan kondisi akuifer yang menyebabkan pembentukan mata air. (a) <i>Faults</i> tertutup menghalangi aliran air tanah (<i>groundwater</i>) menghasilkan mata air; (b) muka air tanah lokal memotong topografi menghasilkan mata air; (c) aliran air tanah melalui jaringan yang dihubungkan bidang retakan-retakan (<i>fracture</i>) dan <i>bedding</i> menghasilkan mata air.	12
6.	Konsep penentuan daerah resapan dan luahan air tanah (modifikasi dari Toth, 1999 dalam Lubis (2006))	15
7.	Beberapa contoh celah batuan dan hubungan antara tekstur batuan dan porositas	27
8.	Model Hubungan Antar Variabel Penelitian	34
9.	Lokasi mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat di Kecamatan Ngantang	39
10.	Kerangka Operasional Penelitian	40
11.	Rata-rata Curah Hujan Bulanan (mm) sejak tahun 1997 hingga 2009 dan Rata-rata Suhu Udara selama tahun 1997-2009 (Sumber: Hairiah <i>et al.</i> , 2008 dan Badan Pengelolaan DAS Bango, 2009)	42
12.	Neraca Air Bulanan di Kecamatan Ngantang	42
13.	Peta Geologi Kecamatan Ngantang	43
14.	Peta Hidrogeologi Kecamatan Ngantang	44
15.	Contoh penentuan plot pengamatan dan garis transek dan Skema Plot Bersarang pada Plot 20 x 20 m	49
16.	Lima titik sounding pengambilan data geolistrik pada mata air Krisik (SN1, SN2, SN3, SN4, SN5), (b) Complang (SNC1, SNC2, SNC3, SNC4, SNC5) dan (c) Pusung pegat (SNP1, SNP2, SNP3, SNP4, SNP5) dan titik sounding yang telah dihubungkan untuk interpretasi 2D struktur bawah permukaan tiga mata air	57
17.	Peta Kelerengan Kecamatan Ngantang	59
18.	Peta relief DAS Konto dan geomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat	59
19.	Hasil interpretasi model 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik, hingga kedalaman 25 m.	62
20.	Hasil interpretasi 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang	65
21.	Hasil interpretasi 2D lapisan bawah permukaan tanah hingga kedalaman 25 m di mata air Pusung pegat	67



22. Lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik dan pola aliran airnya (→) 69
23. Lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang dan pola aliran airnya (→) 70
24. Lapisan bawah permukaan tanah mata air Pusung pegat dan pola aliran airnya (→) 70
25. Profil curah hujan di Jombok dan Ngantang Januari 2009 – Juli 2010 72
26. Hubungan curah hujan dan debit mata air dengan standart error (a) Krisik, (b) Complang dan (c) Pusung pegat dalam satu tahun pengamatan (Juli 2009- Juli 2010) 74
27. Interaksi antara curah hujan dengan debit mata air (a) Krisik, (b) Complang dan (c) Pusung pegat 75
28. Persentase luas SPL pada daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 86
29. Peta daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 88
30. Kedalaman dan ketebalan akuifer di tiga daerah resapan mata air 89
31. Kandungan C-organik tanah pada berbagai SPL di tiga daerah resapan mata air 90
32. Berat Isi (BI) tanah berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di tiga daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung pegat 91
33. Kandungan pasir, debu dan liat pada tekstur tanah pada empat SPL di daerah resapan mata air Krisik 92
34. Kandungan pasir, debu dan liat pada tekstur tanah pada dua SPL di daerah resapan mata air Complang 92
35. Kandungan pasir, debu dan liat pada tekstur tanah pada empat SPL di daerah resapan mata air Pusung pegat 93
36. Porositas tanah berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di tiga daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung pegat 93
37. Kemantapan agregat tanah berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di tiga daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung pegat 94
38. Kondultivitas Hidroulik Jenuh (KHJ) berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung pegat 95
39. Kandungan C-organik tanah di tiga daerah resapan mata air 98
40. Berat Isi Tanah di tiga daerah resapan mata air 99
41. Persentase pasir, debu dan liat pada tekstur di tiga daerah resapan mata air 99
42. Porositas tanah di tiga daerah resapan mata air 100
43. Kemantapa agregat tanah di tiga daerah resapan mata air 100
44. Konduktivitas Hidroulik Jenuh (KHJ) tanah di tiga daerah resapan mata air 101
45. Profil vegetasi di daerah resapan mata air Krisik 103
46. Profil vegetasi di daerah resapan mata air Complang 104
47. Profil vegetasi di daerah resapan mata air Pusung pegat 105
48. Indeks diversitas (H') pohon, belta dan tumbuhan bawah pada SPL-SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 106



49. Profil stratifikasi pohon dan belta pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 107
50. Persentase penutupan kanopi pada SPL di tiga daerah resapan mata air. 108
51. Kerapatan pohon, belta dan tumbuhan bawah di daerah resapan tiga mata air 109
52. Profil INP jenis pohon pada SPL-SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 110
53. Profil INP jenis belta pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 111
54. Profil INP jenis tumbuhan bawah pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 112
55. Profil *C-stock* pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 113
56. Indeks diversitas pohon dan belta di tiga daerah resapan mata air 114
57. Penutupan kanopi per SPL di tiga daerah resapan mata air 115
58. Profil INP jenis pohon di tiga daerah resapan mata air 116
59. Profil INP jenis belta di tiga daerah resapan mata air 116
60. Kerapatan pohon dan belta di ketiga daerah resapan mata air 117
61. Kerapatan tumbuhan bawah di ketiga daerah resapan mata air 117
62. Profil *C-stock* dari SPL-SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 118
63. Kecepatan infiltrasi pada berbagai SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 120
64. Simpanan air tanah pada berbagai SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung pegat 120
65. Kecepatan infiltrasi di tiga daerah resapan mata air. 121
66. Simpanan air tanah pada musim kemarau dan hujan di tiga daerah resapan mata air 122
67. Rancangan Model teoritis (Model struktural) hubungan antara curah hujan, karakteristik lahan, karakteristik biogeohidrofisik dan karakteristik vegetasi dengan debit mata air 128
68. Model hubungan antara curah hujan, karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan mata air dengan debit mata air berdasar analisis PLS 132
69. Hasil Pengujian Hipotesis Model Hubungan Antara Curah Hujan, Karakteristik Lahan, Karakteristik Biogeohidrofisik Dan Karakteristik Vegetasi Di Daerah Resapan Mata Air Dengan Debit Mata Air Berdasar Analisis PLS 140
70. *Reduced model*, Model Hubungan antara Curah Hujan, Karakteristik Lahan, Karakteristik Biogeohidrofisik dan Karakteristik Vegetasi di Daerah Resapan dengan Debit Mata Air. 143
71. Rancangan Reboisasi di Daerah Resapan Mata air Krisik 156
72. Rancangan Reboisasi di Daerah Resapan Mata air Complang 157
73. Rancangan Reboisasi di Daerah Resapan Mata air Pusung Pegat 158



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Teks	Hal .
1.	Indeks Kualitas Biodiversitas yang digunakan di Project Silvopastoral (Pagiola <i>et al.</i> ,2007)	
2.	Uji Korelasi Biofisik Tanah dan Karakteristik vegetasi	
3.	Uji Korelasi antara Biofisik tanah dan Karakteristik vegetasi	
4.	Analisis Komponen Utama (Principal Component Analysis / PCA) Variabel Luas, Geofisik, Biofisik tanah, Karakteristik vegetasi dan Hidrologi	
5.	Pengujian Optimalisasi Debit mata air dengan Analisis <i>Response Surface</i>	
6.	Pengujian Optimalisasi Geofisik dengan Analisis <i>Respon Surface</i>	
7.	Pengujian Optimalisasi Hidrologi dengan Analisis <i>Response Surface</i>	
8.	Pengujian Optimalisasi Biofisik Tanah dengan analisis <i>Response Surface</i>	
9.	Pengujian Optimalisasi Karakteristik vegetasi dengan analisis <i>Response Surface</i>	

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada abad 21 air bisa menjadi salah satu komoditi paling langka di dunia. Hal ini terkait dengan pola konsumsi air masyarakat, baik untuk kebutuhan air minum, rumah tangga, pertanian dan industri, yang terus meningkat. Peningkatan konsumsi air masyarakat dunia mencapai lebih dari dua kali kecepatan penambahan jumlah penduduk. Jumlah penduduk akan mengalami peningkatan sebesar 45% dalam masa 30 tahun mendatang, sementara ketersediaan air hanya dapat ditingkatkan sebesar 10%. UNESCO memperkirakan bahwa pada tahun 2020, air akan menjadi salah satu problem utama di dunia (Anonymous, 2004).

Kelangkaan dan kekeringan air juga telah melanda beberapa wilayah di Indonesia, khususnya Pulau Jawa, Bali dan Nusa Tenggara. Kebutuhan sumber daya air yang terus meningkat tidak dapat diimbangi oleh siklus air yang relatif tetap. Konsumsi air penduduk Indonesia mengalami peningkatan sekitar 10% per tahun pada kurun waktu tahun 1990-2000 dan 6,67% per tahun (2000-2015) (Anonymous, 2007a). Perubahan lahan akibat tekanan aktifitas penduduk mengakibatkan perubahan badan air yang terbentuk di daratan. Contoh nyata di berbagai wilayah pada saat musim hujan mengakibatkan banjir, sedangkan pada saat musim kemarau daerah yang sama mengalami kekeringan. Perubahan ini mengakibatkan penduduk di wilayah-wilayah ini, yang pada awalnya bertumpu pada penggunaan air sungai sebagai sumber air bersih mulai beralih kepada penggunaan air tanah (Lubis, 2006). Ditambah lagi dengan semakin berkembangnya sektor industri yang melakukan eksploitasi air tanah. Eksploitasi air tanah dapat mengakibatkan penurunan muka air tanah secara berkala, sehingga sumur dan mata air mengalami kekeringan.

Selain disebabkan penurunan muka air tanah, isu penurunan debit mata air banyak dilaporkan sebagai akibat kondisi ekosistem di daerah resapan mata air yang terdegradasi. Anonymous (2007a) menyebutkan bahwa sumber-sumber air di Indonesia berada pada kondisi terancam karena peningkatan degradasi hutan. Pada tahun 1984, jumlah daerah tangkapan air yang berada pada kondisi kritis



adalah 22 dan sekarang jumlah tersebut meningkat menjadi 62. Hal tersebut berakibat banyak mata air di Indonesia mengalami penurunan debit, bila dibandingkan dengan kondisi tahun 1970-an. Sahab (2009) melaporkan mata air Cipendawa, Desa Megamendung, Kecamatan Megamendung, Kabupaten Bogor mengering sejak tahun 1998. Hal ini dikaitkan dengan kondisi ekosistem di daerah resapan mata air, dimana lebih dari 50% vegetasi yang ada berupa kebun singkong, selebihnya berupa alang-alang, rumput, semak dan lahan terbuka. Deforestasi menyebabkan hilangnya penutupan kanopi pohon yang melindungi tanah di bawahnya terhadap pukulan air hujan langsung. Sebagai hasilnya, permasalahan pengkerakan tanah menyebabkan penyumbatan pori-pori makro tanah dan infiltrasi tanah menurun, sehingga berdampak pula terhadap pengisian air bawah tanah dan meningkatnya erosi tanah (Bruijnzeel, 2004).

Kecamatan Ngantang (Kabupaten Malang) merupakan salah satu kawasan yang terletak di Sub Daerah Aliran Sungai (Sub DAS) Konto, yang memiliki 71 mata air (Anonymous, 2007b). Lebih dari setengah jumlah mata air di Ngantang berdebit kecil kurang dari 5 l.detik^{-1} , yaitu 37 mata air. Sisanya 34 mata air mempunyai debit lebih dari 5 l.detik^{-1} (hanya satu mata air berdebit 125 l.detik^{-1} , yaitu mata air Tito Ayu yang terletak di Desa Sidodadi). Mata air di wilayah ini dimanfaatkan sebagai salah satu sumber air untuk kebutuhan sehari-hari, seperti air minum, memasak, mencuci dan irigasi bagi sebagian besar penduduk. Pada umumnya mata air tersebut muncul di kawasan pemukiman, ladang dan kebun campuran kopi (88,7%). Sedangkan mata air yang muncul di kawasan perhutani hanya mencapai 11,3%.

Hasil survei Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Kabupaten Malang melaporkan bahwa 63,38% mata air di Kecamatan Ngantang mengalami penurunan hingga lebih dari 50% di musim kemarau, bahkan beberapa mata air berdebit kecil tidak menghasilkan air hingga beberapa bulan (Anonymous, 2007b). Mata air Dompiong (Desa Jombok) menghasilkan debit $2 - 6 \text{ l.detik}^{-1}$. Akan tetapi berdasarkan pengukuran debit pada Juli 2009, debitnya hanya mencapai kurang dari 1 l.detik^{-1} . Penampungan air yang dulu dibuat di dekat mata air sudah lama tidak dipergunakan karena kecilnya debit. Demikian pula dengan beberapa mata air lainnya, seperti mata air Krisik, Complang dan

Pusung Pegat mengalami penurunan debit yang hampir sama dengan mata air Dompiong. Bahkan hasil survei melaporkan mata air Complang dan Pusung Pegat mengering beberapa bulan (Yulistyarini *et al.*, 2009).

Terjadinya fluktuasi debit mata air bisa dikaitkan dengan karakteristik akuifer yang menjadi tempat aliran air. Mata air yang airnya berasal dari akuifer kecil atau sangat permeabel memiliki debit berfluktuasi dan kadang-kadang kering pada musim kemarau (Linsley *et al.*, 1996). Mata air dengan debit bervariasi (tergantung musim), biasanya berasal dari aliran tanah lokal (Sada and Pohlman, 2006). Daerah resapan mata air tersebut umumnya tidak luas dan berada di sekitar mata air. Debit mata air yang airnya berasal dari akuifer bebas tergantung pada curah hujan dan karakteristik daerah resapannya, seperti permeabilitas lapisan tanah atas, struktur dan kedalaman tanah, struktur geologi, permeabilitas akuifer, kemiringan permukaan tanah, penutupan permukaan tanah oleh vegetasi dan luas daerah resapan (Davis and DeWiest, 1966; Valdiya and Bartarya, 1991; Negi and Joshi, 2004; Todd and Mays, 2005).

Dalam menjaga kelestarian sumber daya air, maka pemerintah Indonesia menyusun aksi-aksi strategis yang perlu diimplementasikan, diantaranya: rehabilitasi daerah resapan mata air secara tepat dan efisien, melalui konservasi tanah dengan metode mekanik (misal: terasering) dan metode vegetasi (penghijauan) (Anonimous, 2007a). Perlu dilakukan upaya penghijauan terprogram untuk menciptakan ekosistem lebih stabil, sehingga fungsi hidrologis ekosistem daerah resapan mata air dapat berjalan optimal. Dengan demikian penelitian ini diharapkan dapat memperbaiki fungsi ekosistem di daerah resapan mata air, sehingga terjadi peningkatan debit mata air.

1.2. Perumusan Masalah

Konservasi debit mata air melalui penghijauan terprogram di daerah resapan mata air memerlukan acuan, sehingga perlu dilakukan kajian mengenai hubungan antara vegetasi dengan debit mata air. Hubungan tersebut bisa terjadi langsung atau pun tidak langsung, karena terdapat karakteristik daerah resapan lainnya yang juga mempengaruhi debit mata air. Dengan demikian, perlu dipelajari hubungan antara karakteristik daerah resapan lainnya seperti curah



hujan, karakteristik geofisik, biofisik tanah dan hidrologinya dengan debit mata air. Hubungan antara karakteristik daerah resapan dan debit mata air tersebut diharapkan dapat terlihat pada mata air berdebit kecil (kurang dari 5 l.detik^{-1}) dan berasal dari akuifer dangkal. Untuk mendukung upaya reboisasi terprogram, dalam penelitian ini terdapat beberapa pertanyaan yang perlu dijawab, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik hidrogeomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat?
2. Bagaimana karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan ketiga mata air tersebut?
3. Bagaimana hubungan antara karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan dengan debit mata air ?
4. Bagaimana model optimalisasi daerah resapan untuk memaksimalkan debit mata air?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui karakteristik hidrogeomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat.
2. Mengetahui karakteristik daerah resapan ketiga mata air berdasar kondisi lahan, biogeohidrofisik dan vegetasinya.
3. Eksplorasi hubungan antara karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan dengan debit mata air.
4. Menemukan model optimalisasi daerah resapan untuk memaksimalkan debit mata air.

1.4. Manfaat Penelitian

Pada akhir penelitian diharapkan diperoleh beberapa manfaat

1. Bagi pengembangan ilmu pengetahuan, berupa:
 - (a) pemahaman tentang hubungan antara karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi dalam menentukan debit mata air;
 - (b) dapat memberikan rekomendasi pelaksanaan reboisasi daerah resapan mata air berdasarkan hubungan antara karakteristik vegetasi, lahan, biogeohidrofisik dan debit mata air agar ekosistem yang terbentuk



mampu memberikan layanan ekosistem optimal dalam mengatur dan menyuplai air tanah;

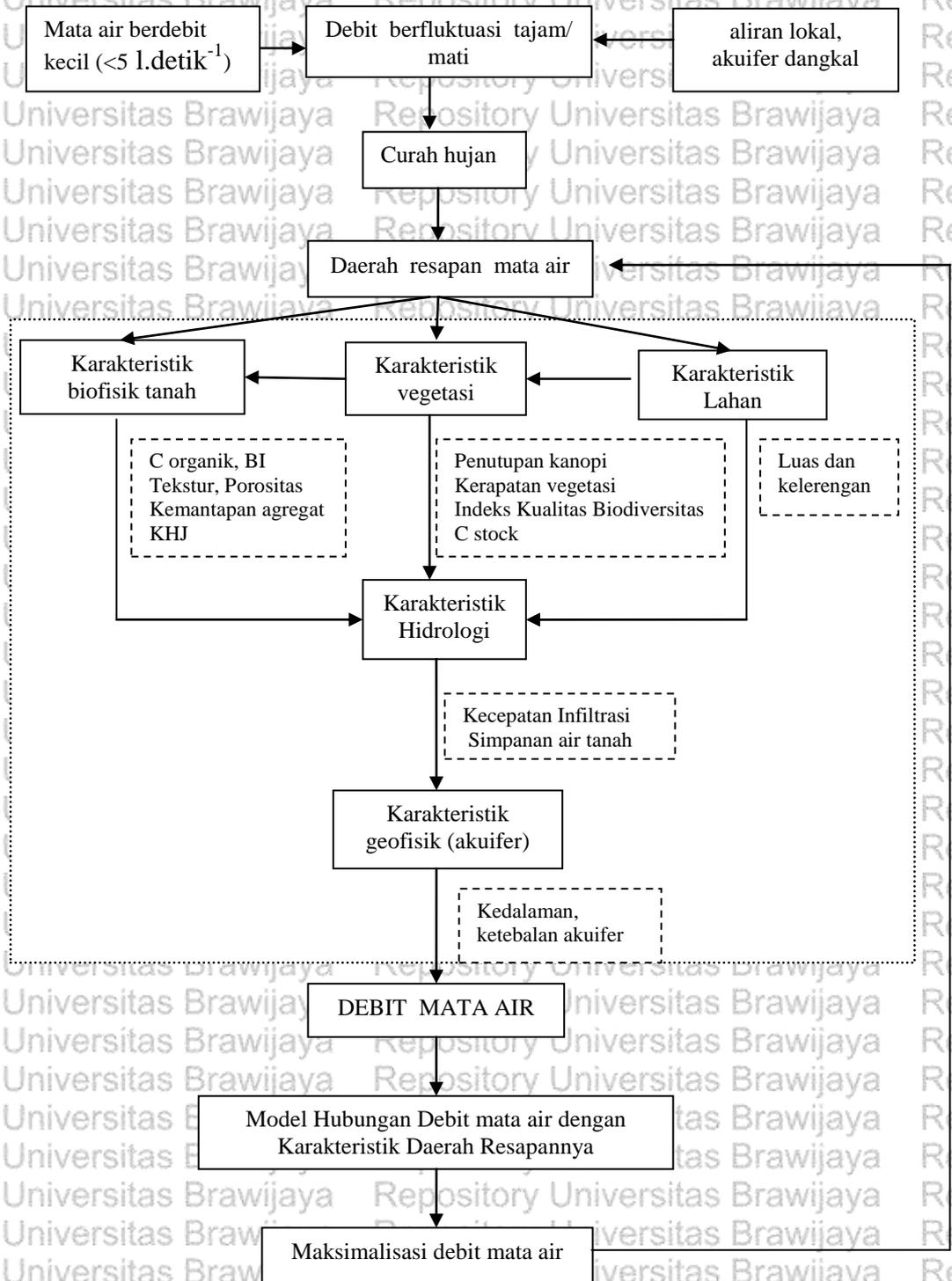
(c) dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan spesies-spesies tumbuhan kunci di daerah resapan mata air yang berpotensi ekonomi, ekologi dan ilmu pengetahuan.

2. Bagi masyarakat umum, hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk meyakinkan masyarakat dan pengambil kebijakan akan pentingnya konservasi biodiversitas di daerah resapan mata air.

1.5. Kerangka Pemikiran Penelitian

Mata air yang menghasilkan debit kecil dan mengalami fluktuasi debit di musim kemarau dan penghujan, umumnya berasal dari akuifer dangkal. Sumber utama akuifer dangkal berasal dari curah hujan. Secara alami, mata air ini didukung oleh sistem aliran air tanah lokal, sehingga debit mata air ini berasal dari daerah resapan yang relatif tidak luas dan dekat dengan mata air. Curah hujan dan karakteristik daerah resapan mata air akan mempengaruhi jumlah air yang meresap ke dalam tanah, sehingga akan mempengaruhi debit mata air. Jumlah air yang meresap ke dalam tanah ditunjukkan oleh karakteristik hidrologi tanah, yang dipengaruhi oleh luas, kelerengan, karakteristik biofisik tanah dan vegetasi di daerah resapannya. Penurunan karakteristik vegetasi, yang terjadi akibat alih guna lahan akan menyebabkan terdegradasinya karakteristik biofisik tanah di daerah imbuhan. Terbukanya permukaan tanah menyebabkan hancurnya agregat tanah akibat energi kinetik air hujan, sehingga berakibat pada penurunan karakteristik fisik tanah. Hal ini diindikasikan dengan terjadinya pemadatan permukaan tanah, penutupan pori-pori makro di lapisan atas, peningkatan berat isi tanah dan penurunan kemampuan tanah mengalirkan air (KHH tanah). Penurunan biofisik tanah menyebabkan berkurangnya karakteristik hidrologi yang ditunjukkan dengan kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah, yang akan mempengaruhi pengisian air bawah tanah (*recharge groundwater*) di akuifer. Terjadinya perubahan kedalaman dan ketebalan akuifer akan mempengaruhi debit mata air. Hubungan antara karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan dengan debit mata air dapat dimodelkan ke dalam bentuk model struktural. Hasil hubungan tersebut dapat digunakan untuk upaya memaksimalkan

debit mata air melalui perbaikan daerah resapan mata air. Secara skematis kerangka pemikiran penelitian disajikan dalam Gambar 1.

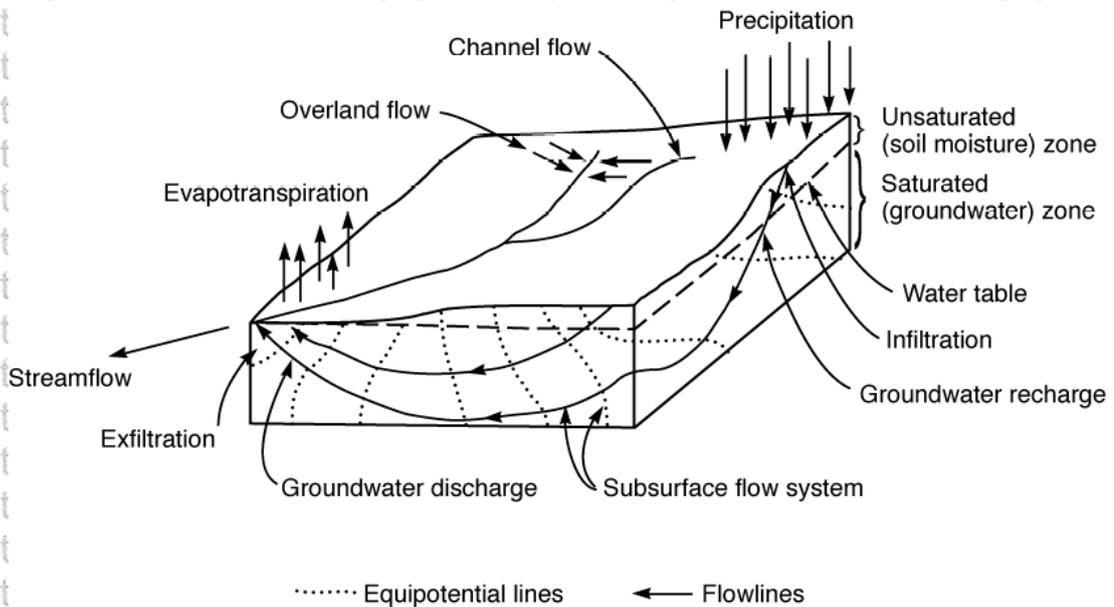


Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Keterkaitan Siklus Hidrologi, Air Tanah dan Mata air

Siklus hidrologi merupakan proses yang saling berkesinambungan. Air laut dan air permukaan tanah mengalami eveporasi menjadi uap air yang akan naik ke atmosfer dan mengalami kondensasi, kemudian turun sebagai hujan yang akan jatuh kembali di lautan dan permukaan tanah. Air hujan diubah oleh vegetasi menjadi *overland flow* (aliran permukaan tanah), mengalami infiltrasi ke dalam tanah dan mengalir melalui tanah sebagai *sub surface flow*. Air yang terinfiltrasi bisa mengalami perkolasi ke lapisan tanah lebih dalam untuk mengisi air tanah (*groundwater recharge*) dan kemudian menjadi mata air atau rembesan ke dalam sungai dan juga menjadi aliran sungai (*groundwater discharge*) (Sophocleuous, 2003)



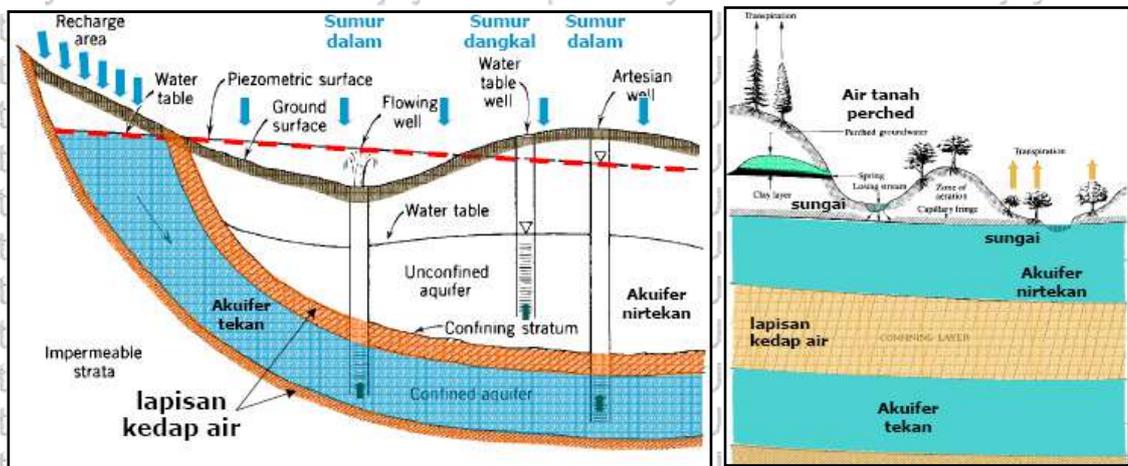
Gambar 2. Skematis suatu Siklus Hidrologi (Freeze, 1974 dalam Sophocleuous, 2003).

Air tanah berada pada beberapa tipe formasi geologi (batuan) yang disebut akuifer. Akuifer merupakan formasi yang terdiri dari material-material permeabel cukup jenuh untuk menghasilkan sejumlah besar air ke sumur atau mata air.

Akuifer mempunyai kemampuan untuk menyimpan dan meneruskan air, misalnya

pasir tidak terkonsolidasi dan kerikil (Todd *and* Mays, 2005). Akuifer pada dasarnya adalah kantong air yang berada di dalam tanah (Asdak, 2004). Terdapat dua tipe akuifer, yang akan menentukan sistem pergerakan air dalam tanah, yaitu akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan akuifer tertekan (*confined aquifer*).

Akuifer bebas terbentuk ketika tinggi muka air tanah menjadi batas atas zona tanah jenuh. Tinggi muka air tanah berfluktuasi tergantung pada jumlah dan kecepatan air hujan yang masuk ke dalam tanah, pengambilan air tanah dan permeabilitas tanah. Akuifer tertekan terbentuk ketika air tanah dalam dibatasi oleh lapisan kedap air (*confined bed*), sehingga tekanan di bawah lapisan kedap air tersebut lebih besar daripada tekanan atmosfer (Gambar 3). Pada sistem akuifer tertekan (*confined aquifer*), air hujan yang jatuh di lokasi kajian tidak akan mengisi air tanah yang ada di bawahnya. Sedangkan pada sistem akuifer tidak tertekan (*unconfined aquifer*) atau akuifer bocoran (*leaky aquifer*), air hujan setempat akan mengisi air tanah yang ada di bawahnya (Sumawijaya *et al.*, 2006).



Gambar 3. Skema irisan melintang yang menggambarkan akuifer tertekan dan tidak tertekan (kiri) dan keberadaan air tanah (Brown *et al.*, 1972)

Suatu cekungan air tanah dicirikan oleh kondisi geologi dan hidrologi tertentu, membentuk berbagai tipologi sistem akuifer yaitu (1) sistem akuifer endapan gunungapi; (2) sistem akuifer batu gamping karst; (3) sistem akuifer batuan sedimen terlipat; (4) sistem akuifer endapan aluvial sungai; (5) sistem akuifer endapan pantai; (6) sistem akuifer batuan kristalin.



2.2. Karakter dan distribusi mata air

Mata air (*spring*) adalah pemusatan keluarnya air tanah (*discharge*) yang muncul di permukaan tanah sebagai arus dari aliran air tanah. Input air pada mata air seluruhnya berasal dari air tanah (*ground water*) (Särkkä *et al.*, 1998; Kemp and Boynton, 2004). Demikian pula yang dikemukakan oleh Brown *et al.* (2007) bahwa sekitar seribu mata air yang tersebar di Pasifik Barat Laut tergantung pada air tanah untuk suplai airnya. Sada and Pohlmann (2006) menyatakan aliran air tanah yang menyuplai mata air dapat bersifat: (1) aliran lokal, dimana air tanah berasal dari area penyumbang relatif lebih kecil dengan zona *recharge* relatif dekat dengan mata air. Mata air ini dapat mempunyai variasi debit, tergantung musim. Debit mata air ini kurang dari 283 l.detik⁻¹; (2) aliran regional, dimana air tanah berasal dari area penyumbang relatif lebih luas. Sumber air ini biasanya menghasilkan mata air dengan debit relatif stabil dan terus menerus. Jika aliran mata air berasal dari aliran air tanah yang lebih dalam, maka bisa menjadi mata air panas. Volume debit mata air ini biasanya mengikuti pola iklim beberapa tahun sebelumnya, dengan besar debit lebih dari 1415 l.detik⁻¹.

Henschke (2005) menyebutkan akuifer membentuk tiga aliran tanah berdasarkan jarak alirannya, yaitu aliran lokal, aliran regional dan aliran *intermediate*. Aliran lokal terjadi di kawasan bukit, dimana *recharge* air tanah terjadi di bukit, sedangkan *discharge* terjadi di lembah di dekatnya. Kawasan *recharge* dan *discharge* tersebut hanya dipisahkan oleh jarak beberapa ratus meter hingga satu atau dua kilometer. Aliran regional terjadi di dataran luas, yang didasari oleh sedimen basin yang dalam dimana air tanah dapat mengalir pada jarak lebih jauh (hingga 50 km) dan kedalamannya dalam. Aliran *intermediate* terjadi pada tempat di antara aliran lokal dan aliran regional dan jalur alirannya mencapai sekitar 10 km.

Berdasarkan sebab terjadinya, mata air diklasifikasikan menjadi dua, yaitu: mata air yang dihasilkan oleh tenaga non gravitasi (*non gravitational spring*) dan mata air yang dihasilkan oleh tenaga gravitasi (*gravitational spring*) (Bryan, 1919 dalam Todd and Mays, 2005). Mata air yang dihasilkan oleh tenaga non gravitasi meliputi: mata air vulkanik, mata air celah, mata air hangat, dan mata air panas.



Sedangkan mata air gravitasi diklasifikasikan menjadi beberapa tipe, yaitu: mata air topografi atau depresi (*depression spring*) yang terbentuk bila permukaan air tanah terpotong oleh topografi; mata air kontak (*contact spring*) terjadi bila lapisan yang lulus air (misal: batu pasir) terletak di atas lapisan kedap air (misal: serpihan), mata air artesis (*artesian spring*) yang keluar dari akuifer tertekan, dan mata air turbuler (*turbulence spring*) yang terdapat pada saluran-saluran alami pada formasi kulit bumi, seperti goa lava atau *joint*.

Meinzer, 1923 dalam Todd and Mays (2005) mengklasifikasikan mata air berdasar debitnya (Tabel 1). Hal yang menarik dari segi potensi airnya, mata air pada sistem gunung api memiliki variasi debit mulai beberapa liter hingga puluhan bahkan ratusan liter per detik.

Tabel 1. Klasifikasi mata air berdasarkan debit (Meinzer, 1923 dalam Todd and Mays, (2005))

Besarnya	Debit
Pertama	$> 10 \text{ m}^3/\text{detik}$
Ke dua	$1 - 10 \text{ m}^3/\text{detik}$
Ke tiga	$0,1 - 1 \text{ m}^3/\text{detik}$
Ke empat	$10 - 100 \text{ l}/\text{detik}$
Ke lima	$1 - 10 \text{ l}/\text{detik}$
Ke enam	$0,1 - 1 \text{ l}/\text{detik}$
Ke tujuh	$10 - 100 \text{ ml}/\text{detik}$
Ke delapan	$< 100 \text{ ml}/\text{detik}$

Terdapat juga pengelompokan mata air berdasarkan sifat alirannya, dimana pemunculan mata air diklasifikasikan menjadi 3 (tiga), yaitu: mata air yang mengalir terus-menerus sepanjang tahun dan tidak dipengaruhi curah hujan (*perennial spring*); mata air yang mengalir beberapa bulan saja sepanjang tahun dan dipengaruhi oleh curah hujan disebut mata air temporal (*intermittent spring*); dan mata air yang sama dengan mata air temporal tetapi perubahan debitnya tidak langsung dipengaruhi oleh curah hujan disebut mata air periodik (*periodic spring*) (Todd and Mays, 2005).

Sada *et al.* (2001) dalam Brown *et al.* (2007) membedakan mata air berdasarkan pada dua tipe kondisi hidrogeologi, yaitu: topografi dan struktur geologi permukaan.

a). Topografi permukaan menyebabkan muka air tanah memotong kemiringan tanah (*topographic controls*), termasuk di sini; mata air depresi (*depression spring*) dan mata air kontak (*contact spring*). Kondisi mata air ini dapat



diidentifikasi pada lanskapnya menggunakan topografi permukaan. Biasanya, mata air ini secara alami cenderung didukung oleh sistem aliran tanah lokal, sehingga berada pada tingkat resiko tinggi terhadap aktivitas yang mengancam air tanah dangkal.

b). Struktur geologi sub permukaan mendorong air tanah muncul di permukaan.

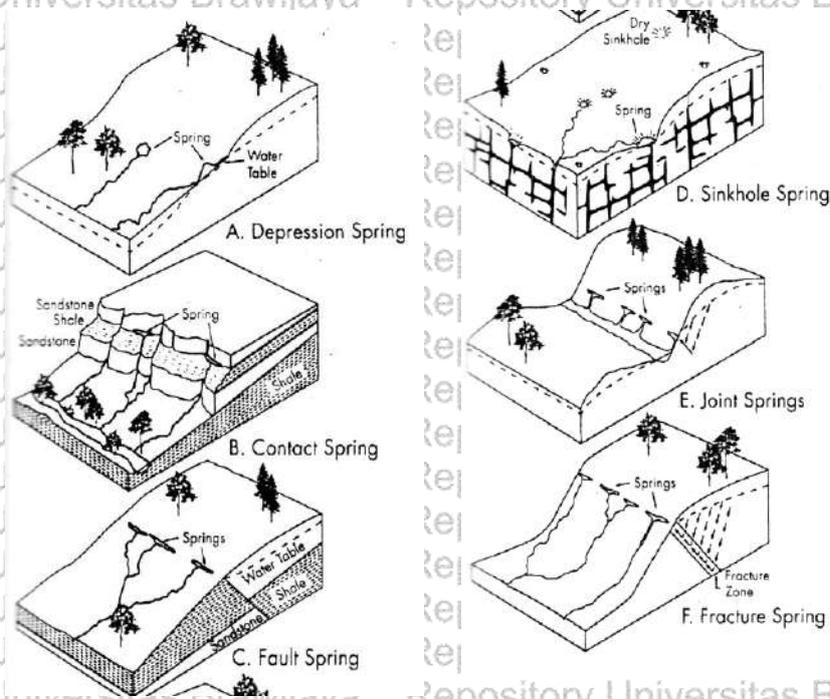
Mata air seperti ini dipengaruhi oleh kondisi geologi sub permukaan (*geologic control*), termasuk di sini : *fault spring, sinkhole spring, joint and fracture springs*. Mata air-mata air dalam kelompok ini disuplai oleh lebih banyak

aliran air tanah regional, bersifat lebih dalam dan karena itu berada pada resiko dari aktivitas yang mengancam sistem aliran air lebih dalam. Mata air

fault terbentuk ketika air mengalir ke permukaan sepanjang garis *fault* dan air secara istimewa mengalir sepanjang *fault* tersebut (atau *fault* bertindak sebagai akuitard (lapisan/tumpukan kurang permeable memotong aliran air tanah).

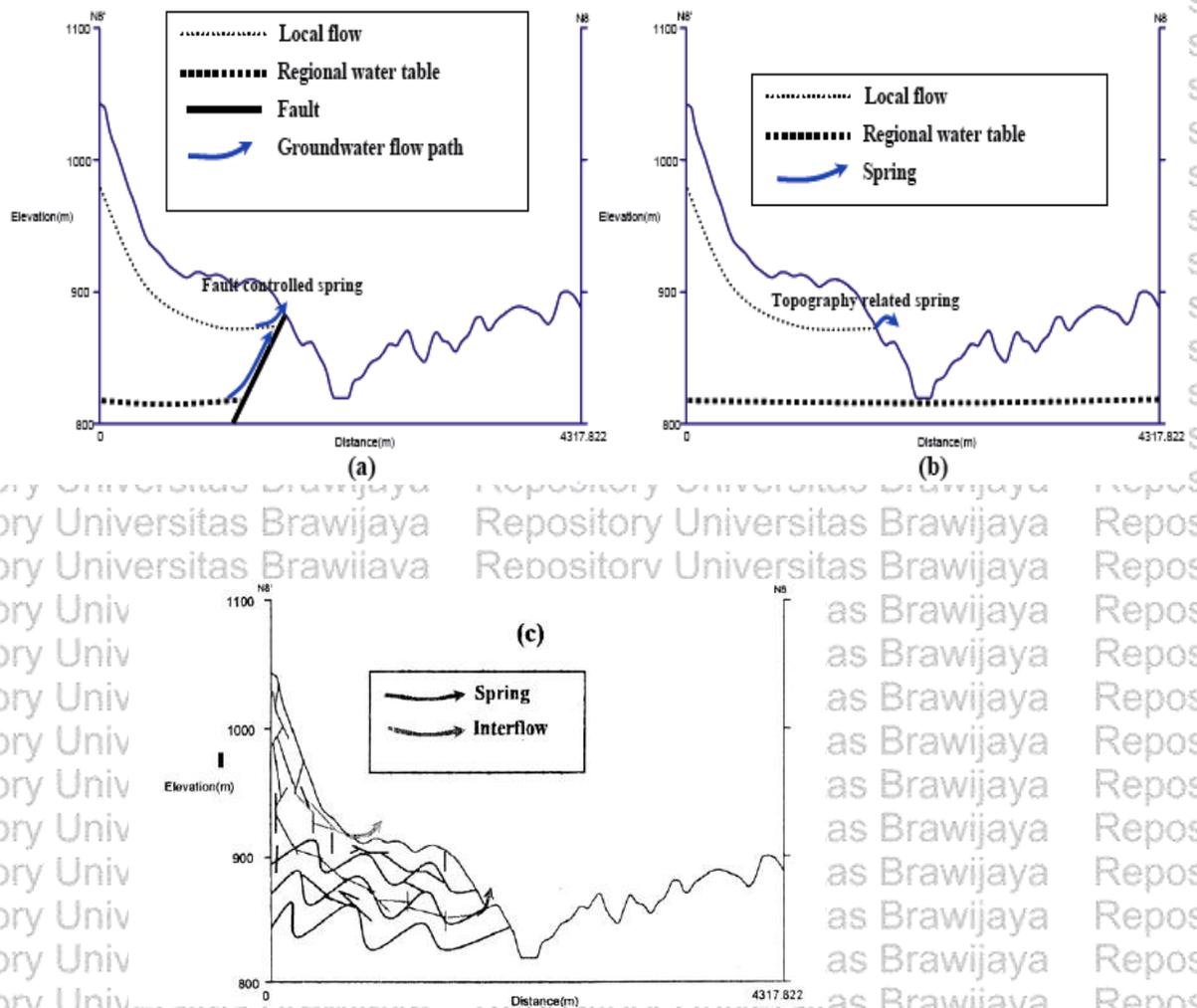
Mata air *sinkhole* terbentuk ketika air melarutkan batu kapur (pada karst) dan permukaan tanah roboh sampai permukaan tersebut menyentuh muka air tanah.

Mata air *joint* dan *fracture* terbentuk jika air mengalir ke atas atau sepanjang rekahan di dalam batu-batuan (Gambar 4)



Gambar 4. Tipe-tipe mata air berdasarkan kondisi hidrogeologinya (Sada *et al.* (2001) dalam Brown *et al.* (2007))

Sirkulasi air tanah dangkal membentuk mata air dingin, sedangkan aliran lebih dalam menghasilkan mata air panas. Diagram konsep (Gambar 5) memperlihatkan kondisi akuifer yang menyebabkan pembentukan mata air. Variasi dalam regim suhu merupakan hal penting untuk ekosistem mata air (Sigonyela, 2006).



Gambar 5. Diagram konsep yang menunjukkan kondisi akuifer yang menyebabkan pembentukan mata air. (a) *Faults* tertutup menghalangi aliran air tanah (*groundwater*) menghasilkan mata air; (b) muka air tanah lokal memotong topografi menghasilkan mata air; (c) aliran air tanah melalui jaringan yang dihubungkan bidang retakan-retakan (*fracture*) dan *bedding* menghasilkan mata air.



Mata air dapat dipandang sebagai ekoton (*ecotone*), dimana mata air terjadi pada peralihan antara air tanah (*groundwater*), air permukaan dan ekosistem darat (Sarkka *et al.*, 1998). Ekoton merupakan zona (habitat alami) yang terletak di antara dua komunitas yang berbeda atau lebih dan biasanya berukuran sempit atau memanjang. Habitat seperti ini pada umumnya bukan merupakan suatu komunitas yang benar-benar berbeda dari komunitas di sekitarnya, walaupun spesies-spesies spesialis kadang-kadang ditemui di sini (Widyatmoko dan Irawati, 2007). Wetzal *et al.* (2000) dalam Singonyela (2006) menyebutkan bahwa mata air merefleksikan komposisi fisika dan kimia di dalam akuifer. Refleksi tersebut ditentukan oleh komposisi mineral strata batuan dan zat-zat kimia yang berperkolasi ke zona jenuh. Tidak seperti air permukaan, pada kondisi normal lingkungan fisik dan kimia air tanah pada mata air kurang bervariasi, sehingga ekoton mata air biasanya mendukung spesies (flora dan fauna) yang tidak toleran terhadap variasi lingkungan yang tinggi atau spesies-spesies endemik (Galas, 2005 dan Singonyela, 2006). Dengan demikian, mata air memiliki ekotipe alami yang khas, artinya ekosistem mata air tersebut memiliki populasi (*flora* dan *fauna*) yang sudah beradaptasi secara lokal, sehingga memiliki ciri-ciri tertentu yang berbeda dengan populasi lainnya. Beberapa jenis fauna yang sering dihubungkan dengan mata air adalah dari ordo Gastropods, Annelids, Isopods dan Amphipods (Singonyela, 2006).

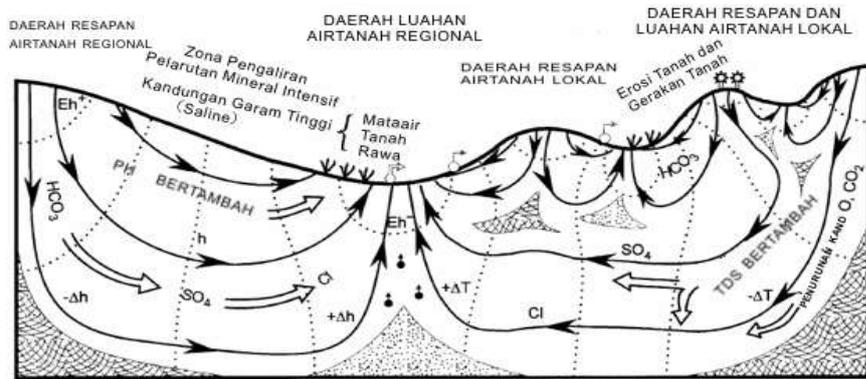
Sedangkan untuk jenis tumbuhan yang ditemui di sekitar mata air dikemukakan oleh Fiqa (2004). Disebutkan bahwa vegetasi ekotipe mata air dataran rendah (0-1200 m dpl) berbeda dengan vegetasi ekotipe mata air di dataran tinggi (1200 – 1800 m dpl). Berdasarkan pengamatan di kawasan DAS Brantas Kabupaten Kediri, ekotipe mata air di dataran rendah didominasi oleh jenis pohon dari Famili Moraceae, seperti beringin (*Ficus benjamina*), gondang (*Ficus variegata*), lo (*Ficus racemosa*), bendo (*Artocarpus elongata*) dan jenis perdu aren (*Arenga pinnata*). Sedangkan pada ekotipe mata air di dataran tinggi banyak dijumpai jenis pohon krukup (*Englehardia spicata*), cemara gunung (*Casuarina junghuhniana*) dan *Ficus spp.*

2.3. Faktor-faktor yang mempengaruhi debit mata air

Distribusi pemunculan mata air berhubungan dengan keterdapatannya curah hujan, karakteristik hidrologi permukaan, karakteristik akuifer dan struktur geologinya (Tolman, 1937). Sedangkan Davis *and* DeWiest (1966) dan Todd *and* Mays (2005) menyebutkan debit mata air bergantung pada luas daerah yang memberikan kontribusi *recharge* air tanah (*recharge area*) ke akuifer, kecepatan dan besarnya *recharge* air tanah.

Daerah resapan air tanah (*recharge zone*) merupakan wilayah dimana air yang berada di permukaan tanah baik air hujan ataupun air permukaan mengalami proses infiltrasi secara gravitasi melalui lubang pori tanah/batuan atau celah/rekahan pada tanah/batuan. Proses infiltrasi ini akan berakumulasi pada satu titik dimana air tersebut menemui suatu lapisan batuan yang bersifat kedap air (*impermeabel*). Titik akumulasi ini akan membentuk suatu zona jenuh air (*saturated zone*) yang merupakan zona air tanah. Perbedaan kondisi fisik secara alami akan mengakibatkan air dalam zonasi ini akan bergerak/mengalir baik secara gravitasi, perbedaan tekanan, kontrol struktur batuan dan parameter lainnya (Lubis, 2006). Sedangkan Stanley *et al.* (1976) menyatakan daerah resapan air tanah biasanya ditandai dengan tingginya laju infiltrasi, sehingga air yang mengalir ke daerah tersebut mudah masuk ke dalam tanah.

Cara penentuan daerah resapan yang akurat yaitu dengan memahami model aliran air tanah (aliran air tanah regional, transisi dan lokal). Kondisi ideal (digambarkan di wilayah sebelah kiri), menunjukkan pergerakan air tanah hanya dikendalikan oleh aliran gravitasi. Kondisi lainnya dimana pergerakan air tanah dikendalikan tidak hanya oleh gravitasi tetapi juga oleh kondisi topografi dan geologi dapat dilihat pada wilayah yang berundulasi di sebelah kanan gambar.



Gambar 6. Konsep penentuan daerah resapan dan luahan air tanah (modifikasi dari Toth, 1999 dalam Lubis (2006))

Selain menggunakan data geologi dan hidrogeologi, penentuan daerah resapan mata air juga bisa dilakukan secara kimiawi, yaitu dengan menggunakan isotop. Azan *et al.* (2006) menganalisis daerah resapan mata air di Daerah Sibolangit, Sumatra Utara dengan menganalisis data geologi dan isotop stabil. Dari studi geologi diperoleh bahwa unsur litologi dan kekar memegang peran penting dalam mengontrol aliran air tanah dari daerah resapan ke daerah ke lokasi mata air. Sedangkan hasil analisis data kandungan isotop stabil dari ^{18}O dan ^2H menunjukkan bahwa mata air Sibolangit (± 500 m dpl) berasal dari kawasan resapan dengan elevasi 632 m hingga 866 m dpl.

Recharge air tanah tidak dapat diukur langsung, tetapi ditunjukkan dengan dua variabel penunjuk *recharge*. Lerner (1990) menyebutkan terdapat dua variabel besarnya *recharge*, yaitu *potential recharge* dan *actual recharge*. *Potential recharge* menunjukkan air tanah (*soil-water*) yang mengalami perkolasi ke bawah zona perakaran dan menjadi simpanan air lapisan tanah bawah. Sedangkan *actual recharge* menunjukkan air tanah yang mencapai akuifer, dapat diduga dari kapasitas perkolasi. Dengan demikian, meningkatnya simpanan air



lapisan tanah bawah dan kapasitas perkolasi diharapkan dapat meningkatkan debit mata air.

Estimasi besarnya *recharge* air tanah dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti metode fisik dan kimia. Salah satu metode fisik yang umum dilakukan adalah membentuk neraca air (*water balance*) kawasan resapan, dimana besarnya *recharge* diestimasi dari perbedaan antara input (air hujan) dan out put (aliran permukaan dan evapotranspirasi) (Misstear, 2000). Sophocleous and McAllister (1987) mengemukakan persamaan *water balance* yang digunakan untuk menghitung komponen-komponen siklus hidrologi sebagai berikut:

$$P + I = RO + D + ET + S$$

P : curah hujan

I : irigasi

RO : aliran permukaan

D : drainase dalam

ET : evapotranspirasi

S : air yang disimpan dalam profil tanah

Besarnya *discharge* air tanah dipengaruhi oleh jumlah *recharge* air tanah dan jumlah air tanah yang diambil oleh pompa pada sumur atau oleh vegetasi (Brown *et al.*, 2007). Kapasitas suatu area tertentu pada skala landscape berperan nyata dalam *recharge* air tanah merupakan fungsi dari permeabilitas tanah, permeabilitas tumpukan batu-batuan dalam tanah dan jumlah total hujan.

Sophocleous and McAllister (1987) menyatakan kecepatan *recharge* air tanah dipengaruhi oleh iklim (curah hujan), tanah dan formasi geologi (akuifer), vegetasi dan *land use*, topografi dan muka air tanah dari daerah resapan mata air.

2.3.1. Iklim (Curah Hujan)

Iklim merupakan faktor penting dalam menentukan besarnya air infiltrasi. Unsur iklim yang paling penting adalah curah hujan dan hari hujan (HH). Jumlah curah hujan tinggi akan menyebabkan jumlah air yang terinfiltrasi semakin besar, sedangkan hari hujan akan menggambarkan distribusinya selama kejadian hujan.

Hujan yang terdistribusi dengan baik dalam kurun kejadian hujan akan berpeluang lebih banyak menjadi air infiltrasi dibanding curah hujan dengan distribusi buruk.

Hubungan antara hujan dan *recharge* sangat kompleks karena hal ini tidak hanya melibatkan total hujan tahunan dan musiman, tetapi juga jumlah dan karakteristik

kejadian hujan individu. Variasi hujan bulanan merupakan aspek lain yang diperhitungkan dalam hubungannya dengan *recharge* air tanah (Heath, 1994).

Pengaruh curah hujan pada mata air dapat dilihat dari terjadinya fluktuasi debit mata air sesuai musim. Davis and DeWiest (1966) menyebutkan umumnya debit mata air berfluktuasi sebagai respon terhadap besarnya curah hujan. Mata air dengan debit kecil mengalir hanya beberapa waktu bergantung pada lamanya hujan. Hubungan curah hujan dan debit mata air digambarkan oleh (Malvicini *et al.*, 2005), dimana mata air Abgaw di Philippina yang berdebit kecil ($0,006 \text{ l.detik}^{-1}$) menunjukkan korelasi paling kuat ($R^2 = 0,70$). Sedangkan mata air Sinti yang berdebit besar (191 l.detik^{-1}) tidak menunjukkan hubungan ($R^2 = 0,08$). Sedangkan mata air lainnya yaitu mata air Kikoy belum mengeluarkan air hingga sebulan setelah turun hujan sebanyak 130 mm. Hal ini diduga karena tanah daerah resapan mata air membutuhkan waktu untuk mencapai kejenuhan sebelum air mengalir kembali dan mungkin juga karena simpanan air tanahnya kecil.

Hubungan positif curah hujan dan debit mata air ditunjukkan oleh mata air di daerah Pegunungan Himalaya Barat, India. Di daerah ini, jenis mata air *fracture/joint/colluvium* (FR/JT/COLL) menunjukkan korelasi yang lebih kuat antara debit mata air dengan curah hujan ($r = 0,595$) dibandingkan dengan jenis mata air *Fracture/ Joint* (FR/JT) dengan $r = 0,174$ (Negi and Joshi, 2004).

2.3.2. Vegetasi

a. Karakteristik vegetasi

Biodiversitas di hutan berperan penting dalam menjaga kestabilan dan fungsi ekosistem sehingga memberikan berbagai pelayanan ekologi yang bermanfaat bagi kesejahteraan manusia. Pada umumnya semakin kompleks biodiversitas suatu lahan maka ekosistem semakin stabil (Swift, 2003). Vegetasi sebagai salah satu komponen ekosistem hutan berperan dalam menjaga kestabilan ekosistem. Karakteristik vegetasi terkait dengan fungsi suatu jenis atau komunitas dalam integritas ekologis pada suatu tempat (Barthlott *et al.*, 1999). Karakteristik vegetasi tinggi akan meningkatkan layanan ekosistem, salah satunya regulasi dan suplai air. Beberapa indikator karakteristik vegetasi diantaranya struktur dan komposisi vegetasi, dominansi jenis, diversitas jenis dan derajat endemisme.



Struktur dan komposisi vegetasi merupakan salah satu aspek penting untuk mengungkapkan bagaimana kondisi suatu komunitas tersebut dalam sistem kehidupan, terutama organisasi populasi dan interaksinya masing-masing. Struktur suatu vegetasi terdiri dari individu-individu yang membentuk tegakan di dalam suatu ruang. Komunitas vegetasi terdiri dari sekelompok tumbuh-tumbuhan yang masing-masing individu mempertahankan sifatnya (Muller-Dombois and Ellenbeg, 1974). Lebih lanjut Kershaw (1973) menyebutkan struktur vegetasi terdiri dari 3 komponen, yaitu: (1) struktur vertikal (stratifikasi ke dalam lapisan-lapisan menurut ketinggian), merupakan diagram profil yang melukiskan lapisan pohon, tiang, saphan, semai dan herba penyusun vegetasi, (2) struktur horisontal, yang menggambarkan letak dari suatu individu terhadap individu lain, (3) jumlah struktur, yang merupakan kelimpahan (*abundance*) setiap jenis dalam suatu komunitas.

Pentapan kanopi (*plant cover*) efektif berperan dalam mengontrol erosi, karena kanopi menyerap energi kinetik yang dihasilkan butiran hujan, menutupi sebagian besar tanah ketika curah hujan tinggi, mengurangi aliran permukaan dan memelihara porositas permukaan tanah (Zhang *et al.*, 2005). Penutupan kanopi bisa dijadikan prioritas dalam upaya meningkatkan manajemen air, infiltrasi, produksi biomasa dan konservasi tanah. Beberapa peneliti menggunakan *plant cover* sebagai indikator untuk evaluasi status fungsi ekosistem dalam proyek restorasi (Maestre *et al.*, 2006).

Diversitas jenis sebagai indikator karakteristik vegetasi mempunyai dua komponen, yaitu: *evenness* (bagaimana kelimpahan atau biomassa didistribusikan dengan rata di antara jenis dan *richness* (jumlah jenis dalam unit area) (Stirling and Wilsey, 2001). *Evenness* tinggi dapat meningkatkan resistensi invasi, jumlah dan produktivitas organisme *below-ground* dan dapat mengurangi kecepatan kepunahan tanaman lokal (Wilsey and Polley, 2002; Smith *et al.*, 2004).

Diversitas vegetasi tinggi menunjukkan bahwa suatu ekosistem memiliki tingkat stabilitas ekologi tinggi. Stabilitas ekologi sangat penting untuk kesehatan ekosistem di dalam hutan karena hal ini mampu mengindikasikan bahwa semua proses aliran energi dan interaksi organisme secara alami sedang berfungsi dengan baik (Lindenmayer *et al.*, 2006).



b. Peran vegetasi dalam hidrologi suatu kawasan

Peran hutan terhadap pengendalian daur air dimulai dari peran tajuk menyimpan air intersepsi. Di hutan klimaks intersepsi bisa mencapai angka 25 – 35 % dari hujan tahunan yang jatuh dan di hutan pinus bisa mencapai 16-20 % dari hujan tahunan yang jatuh (Soedjoko *et al.*, 1998). Peran ke dua adalah vegetasi mengendalikan air melalui evapotranspirasi. Evapotranspirasi punya pengaruh yang penting terhadap besarnya cadangan air tanah, terutama untuk kawasan yang berhujan rendah. Peran ketiga adalah mampu mengendalikan tingginya lensa tanah hutan. Tanah mempunyai kemampuan untuk menyimpan air (lensa tanah), karena memiliki rongga-rongga yang dapat diisi dengan udara/cairan atau bersifat porous. Peran ke empat adalah dalam pengendalian aliran air.

Vegetasi berinteraksi dengan tanah dalam mempengaruhi hidrologi suatu kawasan, sehingga dapat mengatur aliran air hujan hingga menjadi air tanah, yaitu:

1. Kanopi vegetasi mengintersepsi dan mengevaporasikan kembali air hujan ke atmosfer atau mengalirkannya ke permukaan tanah melalui aliran batang (*stem flow*) dan curahan tajuk atau aliran tembus tajuk (*throughfall*);
2. Seresah vegetasi akan melindungi tanah dari hampasan langsung air hujan dan dapat menambah BOT, sehingga dapat mempertahankan karakteristik biofisik tanah;
3. Akar vegetasi menyediakan saluran untuk aliran air melalui *preferential flow* dari zona tak jenuh menuju muka air tanah, terutama pada tanah yang mempunyai permeabilitas rendah, sehingga terjadi peningkatan recharge air tanah;
4. Ekstraksi air tanah pada zona tidak jenuh oleh akar tanaman untuk melakukan transpirasi, menurunkan jumlah perkolasi air, yang mencapai zona jenuh (*recharge*); dan
5. Ekstraksi air tanah pada zona jenuh sebagai proses *discharge* evaporasi dari sistem yang bisa menurunkan permukaan *piezometric* (Maitre *et al.*, 1999).

van Noordwijk *et al.* (2004) menyebutkan bahwa tutupan pohon mempengaruhi aliran air dalam berbagai tahap, diantaranya intersepsi air hujan, infiltrasi air dan serapan air.

1. Intersepsi air hujan: Selama kejadian hujan, tajuk pohon dapat mengintersepsi dan menyimpan sejumlah air hujan dalam bentuk lapisan tipis air (*waterfilm*) pada permukaan daun dan batang, yang selanjutnya akan mengalami evaporasi sebelum jatuh ke tanah.
2. Infiltrasi air: Proses infiltrasi tergantung pada struktur tanah pada lapisan permukaan dan berbagai lapisan dalam profil tanah.
3. Serapan air: Sepanjang tahun tanaman menyerap air dari berbagai lapisan tanah untuk mendukung proses transpirasi pada permukaan daun. Serapan air oleh pohon diantara kejadian hujan akan mempengaruhi jumlah air yang dapat disimpan dari kejadian hujan berikutnya, sehingga selanjutnya akan mempengaruhi proses infiltrasi dan aliran permukaan. Vegetasi (pohon) berperan dalam melakukan serapan air pada musim kemarau, khususnya dari lapisan tanah bawah sehingga mempengaruhi jumlah air tersedia untuk 'aliran lambat' (*slow flow*).

Perubahan struktur dan penutupan vegetasi, terutama dari vegetasi rendah, seperti padang rumput menjadi vegetasi tinggi (hutan) dapat berpengaruh nyata pada *recharge* air tanah dengan perubahan komponen-komponen siklus hidrologi seperti intersepsi, infiltrasi, aliran permukaan, transpirasi dan kedalaman sistem perakaran (Maitre *et al.*, 1999). Jumlah air yang hilang tergantung pada lama dan intensitas curah hujan, area dan kekasaran permukaan tumbuhan atau seresah yang menyimpan atau menyerap air (Larcher, 1983). Intensitas hujan tinggi dan waktu hujan yang lama.

Faktor yang memberikan andil lebih besar dalam peningkatan laju infiltrasi adalah produksi seresah masing-masing pohon (Arrijani, 2006). Jenis rasamala (*Altingia excelsa*) dan gondang (*Ficus variegata*) merupakan pohon dengan nilai infiltrasi tinggi di bawah tajuknya. Hal ini karena produksi seresah kedua pohon tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan jenis pohon lainnya. Aliran permukaan yang terjadi di bawah tajuk gondang (*F. variegata*) juga lebih rendah dibandingkan pohon lainnya.



Hairiah *et al.* (2004) menyebutkan tiga hal yang dapat menjelaskan rendahnya limpasan pada hutan adalah (a) besarnya intersepsi oleh tajuk vegetasi yang berlapis dan rapat, (b) tebalnya seresah sehingga mampu menampung air dalam jumlah besar sebagai *surface storage* dan (c) banyaknya pori makro di permukaan tanah yang mendorong tingginya laju infiltrasi. Masukan seresah sekitar $8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ th}^{-1}$ dari hasil pangkasan gamal (*Gliricidia sepium*) dapat meningkatkan porositas 45% menjadi 55% (Priyono *et al.*, 1996 dalam Hairiah *et al.*, 2004).

Vegetasi meningkatkan kecepatan perkolasi dengan menciptakan pori tanah dengan akarnya untuk aliran air melalui profil tanah yang disebut *preferential flow*. Aliran ini berpengaruh nyata terhadap kecepatan *recharge* yaitu terjadi peningkatan aliran vertikal dari 2,2-7,2 mm per tahun menjadi 50-100 mm per tahun (Johnston, 1987 dalam Maitre, 1999). Hairiah *et al.* (2000) menyatakan akar pepohonan berperan dalam memperbaiki struktur dan porositas tanah, akar pohon yang telah mati akan meninggalkan pori-pori. Pori tersebut dapat meningkatkan infiltrasi air. Perkembangan perakaran yang menyebar ke dalam lapisan tanah, baik secara vertikal maupun horisontal berdampak terhadap peningkatan makroporositas tanah. Hal ini ditunjukkan dengan lebih tingginya biomassa akar di hutan Sumber Jaya, Lampung dibandingkan dengan biomassa akar di kebun kopi monokultur (Suprayogo *et al.*, 2004).

2.3.3. Karakteristik biofisik tanah

Proses infiltrasi tergantung pada karakteristik biofisik permukaan tanah, diantaranya kegiatan biologi dan unsur organik, jenis dan kedalaman seresah, tekstur dan struktur tanah, kelembaban awal (Asdak, 2004). Tanah hutan mempunyai laju infiltrasi permukaan yang tinggi dan pori makro yang relatif banyak, sejalan dengan tingginya aktivitas biologi tanah dan *turnover* perakaran. Kondisi ini mendukung air hujan yang jatuh dapat mengalir ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam dan juga mengalir secara lateral (Susswein *et al.*, 2001). Seresah dan aktivitas biologi dalam tanah akan mempengaruhi sifat fisik tanah, yaitu struktur, kemantapan agregat dan pori makro tanah.

Seresah yang dihasilkan vegetasi dapat meningkatkan infiltrasi air karena seresah ini dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah (BOT). BOT



dapat menambah kemampuan masuknya air selama hujan dan menjamin meningkatnya simpanan air tanah. Setiap BOT sebesar 1% dapat menambah simpanan air tanah sebesar 16.000 *gallon/ foot cubic*. BOT meningkatkan infiltrasi air karena BOT ini dapat memperbaiki struktur tanah, yaitu terjadi peningkatan pori makro tanah (Carrow and Waltz, 1985). Hasil penelitian ini diperkuat dengan hasil penelitian di Sumberjaya, Lampung Barat, yang menyebutkan bahwa hutan memiliki infiltrasi lebih tinggi sebesar 5,1 mm menit⁻¹ dibandingkan dengan agroforestri kopi dan kopi monokultur (1,01 mm menit⁻¹) (Hairiah *et al.*, 2004). Tingginya infiltrasi tersebut berkorelasi kuat dengan peningkatan jumlah pori makro tanah ($r^2 = 0,7097$). Sedangkan peningkatan pori makro tanah berkaitan dengan tingginya ketebalan seresah hutan. Dari hasil penelitian tersebut diketahui alih guna lahan hutan menjadi sistem kopi campuran (agroforestri) menurunkan ketebalan lapisan seresah pada permukaan tanah sekitar 40 % hingga 60 % (Hairiah *et al.*, 2006).

Pembentukan pori makro tanah, selain oleh adanya celah atau ruang yang terbentuk dari pemadatan matrik tanah juga disebabkan oleh adanya aktivitas perakaran, biota tanah, pembengkakan, perekahan dan pengkerutan tanah. Perkembangan perakaran tanaman hutan mampu menekan dan memperenggang agregat tanah yang berdekatan. Penyerapan air oleh akar tanaman hutan menyebabkan dehidrasi tanah, pengkerutan, dan terbukanya rekahan-rekahan kecil. Kedua proses tersebut dapat memicu terbentuknya pori makro. Lebih jauh, eksudat akar dan akar yang mati khususnya akar rambut akan memicu aktivitas mikroorganisme yang akan menghasilkan bahan humik yang berfungsi sebagai semen. Bahan humik tanah mempunyai peranan yang besar terhadap agregasi liat tanah yang berukuran relatif kecil, sedang peranannya terhadap agregasi agregat kecil atau partikel debu dan pasir relatif kecil (Marshall *et al.*, 1999).

Kapasitas infiltrasi berkorelasi dengan sifat fisik tanah, yaitu berkorelasi positif terhadap porositas dan kandungan bahan organik, dan berkorelasi negatif terhadap kandungan liat dan berat isi tanah (Lee, 1990). Terdegradasinya sifat-sifat fisik tanah akibat alih guna hutan menjadi agroforestri kopi campuran menyebabkan penurunan infiltrasi air di hutan 5,05 menjadi 1,01 mm.menit⁻¹ pada lahan kopi campuran tanpa seresah. Selain itu, terjadi juga peningkatan limpasan



permukaan kebun kopi monokultur hingga enam kali lipat dibanding lahan hutan. Besarnya air yang berinfiltrasi ke zona perakaran akan menentukan besarnya air yang berperkolasi ke lapisan tanah bawah dan tersimpan dalam bentuk kelembaban tanah (*soil moisture water storage*) (Suprayogo *et al.*, 2004).

Setelah air berinfiltrasi ke permukaan tanah, maka air akan mengalami perkolasi ke zona perakaran. Kelebihan air pada zona ini menyebabkan air berperkolasi ke lapisan tanah bawah dan tersimpan dalam bentuk kelembaban tanah.

Perkolasi merupakan pergerakan air menembus profil tanah menuju air tanah (Linsley *et al.*, 1996). Perkolasi merupakan pergerakan air pada kondisi tidak jenuh. Pada kondisi ini, air bergerak ke bawah karena gradien potensi matrik.

Tingkat aliran air pada zona tidak jenuh lebih lambat dari zona jenuh. Carrow and Waltz (1985) menyatakan perkolasi merupakan pelepasan air dalam internal tanah yaitu ketika air meninggalkan zona perakaran.

Potensi lapisan tanah bawah dalam meresapkan air ditentukan oleh kapasitas perkolasi. Sifat tanah yang sangat menentukan kapasitas perkolasi adalah nilai permeabilitas tanah. Permeabilitas merupakan kemampuan gerakan air tanah melalui akuifer karena pengaruh perbedaan tekanan hidrolika atau volume air yang bergerak melalui penampang tanah per satuan waktu (Walton, 1970). Besarnya nilai permeabilitas tanah ditentukan oleh ukuran material penyusun tanah (tekstur dan struktur) serta konduktivitas hidrolik tanah. Tanah pasir memiliki konduktivitas hidrolik lebih tinggi dibanding tanah liat (Landon, 1984).

Perkolasi tidak berjalan efektif di lapisan tanah yang masih kering. Pada tanah kering air tidak dapat bergerak akibat tertahan oleh rendahnya tenaga potensial dan dihambat oleh sempitnya pori dan film air. Custovic and Hakl (2003) menyebutkan bahwa perbedaan tingkat perkolasi tanah liat tergantung pada kondisi kelembaban tanahnya. Pada kondisi jenuh terjadi perkolasi sebesar 82,4%, setengah jenuh sebesar 70,3% dan tidak jenuh sebesar 64,3%.

Hubungan antara tekstur, struktur dan nilai konduktivitas hidrolik terdapat pada Tabel 2.



Tabel 2. Tekstur, struktur dan konduktivitas hidrolik (Landon, 1984)

No.	Tekstur	Struktur	Kond.Hidrolik (cm.jam ⁻¹)
1.	Kerikil, pasir kasar	Berbutir tunggal	≥ 50
2.	Pasir sedang	Berbutir tunggal	25 – 50
3.	Pasir halus, pasir berlempung	Remah, Berbutir tunggal	12 – 25
4.	Lempung berliat, debu, lempung berdebu, lempung berpasir, lempung	Remah, gumpal dan kersai	6 – 12
5.	Lempung berliat, debu, lempung berdebu, lempung berpasir halus, lempung	Prismatik sedang dan gumpal	2 – 6
6.	Liat, liat berdebu, liat berpasir, liat berdebu, lempung berliat, lempung berdebu, debu, lempung liat berpasir.	Prismatik halus dan sedang, gumpal, lempeng	0,5 – 5
7.	Liat, lempung berliat, liat lempung liat berpasir.	Prismatik halus dan sangat halus, gumpal, lempeng	0,25- 0,5
8.	Liat, liat berat	Masif, tiang sangat halus	< 0,25

Penilaian besarnya kapasitas perkolasi dapat dilakukan dengan menggunakan pedoman nilai konduktivitas hidrolik (FAO, 1963 dalam Landon, 1984). Pedoman tersebut terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai dan kelas konduktivitas hidrolik tanah (Landon, 1984)

No	Konduktivitas hidroulik		Klas konduktivitas
	(m/hari)	cm/jam	
1.	< 0,2	< 0,8	Sangat lambat
2.	0,2 – 0,5	0,8 – 2,0	Lambat
3.	0,5 – 1,4	2,0 – 6,0	Sedang
4.	1,4 – 1,9	6,0 – 8,0	Sedang cepat
5.	1,9 – 3,0	8,0 – 12,5	Cepat
6.	3,0	> 12,5	Sangat cepat

2.3.4. Karakteristik hidrologi

Kapasitas infiltrasi berkorelasi dengan sifat fisik tanah, yaitu berkorelasi positif terhadap porositas dan kandungan bahan organik, dan berkorelasi negatif terhadap kandungan liat dan berat isi tanah (Lee, 1990). Terdegradasinya sifat-sifat fisik tanah akibat alih guna hutan menjadi agroforestri kopi campuran menyebabkan penurunan infiltrasi air di hutan 5,05 menjadi 1,01 mm menit⁻¹ pada lahan kopi campuran tanpa seresah. Selain itu, terjadi juga peningkatan limpasan permukaan kebun kopi monokultur hingga enam kali lipat dibanding lahan hutan. Besarnya air yang berinfiltrasi ke zona perakaran akan menentukan besarnya air yang berperkolasi ke lapisan tanah bawah dan tersimpan dalam bentuk kelembaban tanah (*soil moisture water storage*) (Suprayogo *et al.*, 2004).



Setelah air berinfiltrasi ke permukaan tanah, maka air akan mengalami perkolasi ke zona perakaran. Kelebihan air pada zona ini menyebabkan air berperkolasi ke lapisan tanah bawah dan tersimpan dalam bentuk kelembaban tanah. Perkolasi merupakan pergerakan air menembus profil tanah menuju air tanah (Linsley *et al.*, 1996). Perkolasi merupakan pergerakan air pada kondisi tidak jenuh. Pada kondisi ini, air bergerak ke bawah karena gradien potensi matrik. Tingkat aliran air pada zona tidak jenuh lebih lambat dari zona jenuh. Carrow *and* Waltz (1985) menyatakan perkolasi merupakan pelepasan air dalam internal tanah yaitu ketika air meninggalkan zona perakaran.

Sistem tataguna lahan dengan tipe vegetasi penutup berupa pohon mempunyai kemampuan menyimpan air tanah lebih tinggi dibandingkan sistem tataguna lahan dengan tipe vegetasi penutup berupa semak dan rumput. LPP Tahura Raja Lelo Bengkulu memperlihatkan bahwa lahan dengan tegakan pohon, karet dan kakao memiliki kapasitas simpanan air tanah yang tinggi, berturut-turut 198,55; 199,24 dan 197,14 mm. Sedangkan lahan dengan tipe vegetasi penutupnya berupa semak, lahan terdegradasi, kopi dan pohon dengan diameter kurang dari 30 cm memiliki kapasitas simpanan air tanah lebih rendah sebesar 118,11; 150,85; 152,5 dan 163,32 mm (Suharto, 2006).

2.3.5. Karakteristik geofisik

Oleh karena seluruh masukan air pada mata air berasal dari air tanah, maka aliran mata air dipengaruhi oleh gerakan air tanah (Särkkä *et al.*, 1998; Kemp *and* Boynton, 2004). Formasi geologi yang dikenal dengan akuifer, merupakan faktor penting dalam menghasilkan jumlah air ke mata air (Davis *and* DeWiest (1966); Todd *and* Mays, (2005)). Kombinasi antara besarnya infiltrasi air hujan, luasnya daerah resapan (*recharge area*) dan struktur geologi yang sesuai akan menghasilkan debit air pada mata air. Karakteristik geofisik mata air ditunjukkan oleh karakteristik akuifer penyusun daerah resapan mata air.

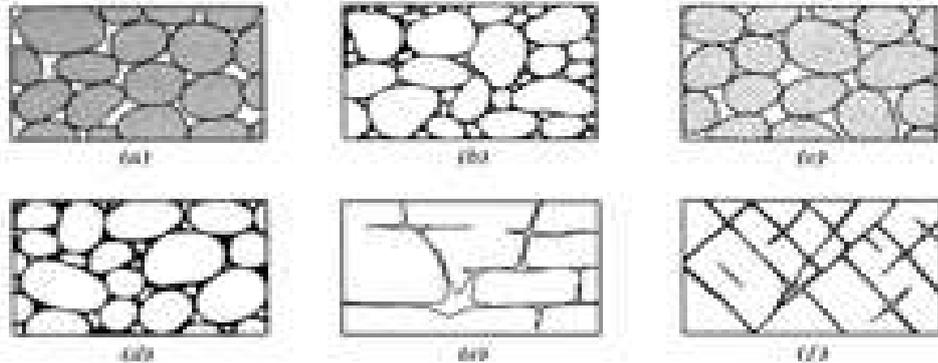
Pentingnya kondisi geologi kawasan mata air, juga dikemukakan oleh Ardina (1985), yang menyatakan bahwa meskipun curah hujan merupakan hal pokok yang berkaitan dengan keterdapatn mata air di suatu daerah, namun adanya perbedaan susunan batu-batuan akan menyebabkan perbedaan debit mata air antara daerah satu dengan daerah lainnya. Bahkan di suatu daerah yang



mempunyai curah hujan lebih tinggi dapat memiliki rata-rata debit mata air lebih rendah sedikit apabila susunan batuan-nya tidak mendukung. Daerah dengan curah hujan dan susunan batuan sama, seperti pada gunung api muda, dapat memiliki debit mata air berbeda, karena susunan kimia batuan-nya juga berbeda.

Karakteristik akuifer yang akan mempengaruhi proses dan mekanisme pengisian air tanah, yaitu tipe dan zona formasi geologi (Asdak, 2004). Tipe akuifer (jenis batuan) akan menentukan tingkat permeabilitas akuifer. Terdapat tiga tipe formasi batuan induk yaitu formasi batuan terserpih (*fractured rocks*), batuan yang bersifat porous dan batuan yang tidak terkonsolidasi (*unconsolidate rocks*). Formasi batuan terserpih terdiri dari semua jenis batuan metamorfik, batuan vulkanik serta batuan sedimen lainnya (terutama *limestones*). Batuan yang berifat porous terdiri atas batuan pasir serta beberapa jenis batuan granit. Sedangkan batuan tidak terkonsolidasi terdiri dari kerikil, pasir dan debu. Sifat permeabilitas batuan yang bersifat porous serta batuan yang tidak terkonsolidasi ditentukan oleh ukuran dan tingkat kedekatan ruangan yang tercipta dalam masing-masing batuan. Sementara itu permeabilitas untuk batuan terserpih ditentukan oleh ukuran, frekuensi dan tingkat jalinan serpihan batuan tersebut. Sedangkan posisi geometri dan konfigurasi porositas akuifer akan memberikan pengaruh yang menentukan arah dan kecepatan air tanah yang melaluinya. Oleh karenanya, air tanah yang bergerak melalui akuifer yang tidak terkonsolidasi relatif menjadi lebih lambat, tetapi sebaran air tanahnya lebih merata.

Susunan geologi yang dapat bertindak sebagai akuifer adalah: kerikil dan pasir, batu gamping, batuan gunung berapi, batu pasir, tanah lempung khusus yang bercampur dengan bahan yang lebih kasar, konglomerat dan batu kristalin. Porositas dalam endapan ini tergantung pada bentuk dan susunan masing-masing butir dan tingkat sementasi serta pemadatannya. Besarnya porositas berada antara mendekati 0% sampai lebih dari 50 %, tergantung faktor di atas dan tipe materialnya.



Gambar 7. Beberapa contoh celah batuan dan hubungan antara tekstur batuan dan porositas (Todd and Mays, 2005)

Keterangan :

- Deposit sedimen seragam dengan porositas tinggi
- Deposit sedimen tak seragam dengan porositas rendah
- Deposit sedimen seragam dari batuan yang porous shg secara keseluruhan porositasnya tinggi
- Deposit sedimen seragam yang porositasnya berkurang karena adanya endapan mineral diantaranya
- Batuan porous karena pengikisan
- Batuan porous karena retakan

Material batuan pembentuk akuifer atau formasi geologi yang dapat berfungsi sebagai akuifer adalah endapan aluvial, batu gamping, batuan vulkanik, batu pasir, batuan beku, dan batuan malihan. Pada endapan aluvial, hampir 90% air tanah terdapat pada material lepas, yaitu kerikil dan pasir. Batu gamping mempunyai variasi yang besar dalam densitas, kesarangan, dan kelulusan. Variasi ini tergantung dari derajat pemampatan dan perkembangan rekahan pada saat pembentukannya. Batuan vulkanik mempunyai sifat dapat membentuk suatu akuifer dengan kelulusan tinggi, karena karakteristik dari batuan ini berpori-pori dan mempunyai banyak retakan. Batu pasir dan konglomerat merupakan batuan yang terbentuk dari kerikil dan pasir yang tersemen, bila keduanya mempunyai banyak retakan akan diperoleh hasil air baik, sedangkan pada batuan beku dan batuan malihan merupakan jenis batuan yang relatif kedap air dan bukanlah akuifer yang baik (Todd and Mays, 2005). Sedangkan harga-harga porositas beberapa bahan sedimen dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Porositas beberapa batuan sedimen (Todd and Mays, 2005)

Material	Porositas (%)
Tanah	50 – 60
Tanah liat	45 – 55
Lanau (silt)	40 – 50
Pasir medium sampai kasar	35 – 40
Pasir berbutir sampai sama (uniform)	30 – 40
Pasir halus sampai medium	30 – 35
Kerikil	30 – 40
Kerikil berpasir	20 – 35
Batu pasir	10 – 20
Shale	1 – 10
Batu kapur	1 – 10

Umur batuan juga dapat mempengaruhi debit mata air, Ardina (1985) menjelaskan tentang hubungan antara litologi (gunung api tua, gunung api muda, batu gamping tua, dan batu gamping muda) dengan debit mata air yang keluar dari masing-masing formasi batuan tersebut. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa pada formasi gunung api tua memberikan nilai korelasi sebesar 0,90 terhadap debit mata air, sedangkan pada gunung api muda memberikan korelasi sebesar 0,95 terhadap debit mata air. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tua umur batuan gunung api, maka semakin kecil pengaruhnya terhadap debit mata air yang muncul. Hal ini dapat terjadi karena dalam perkembangannya semakin tua umur batuan gunung api, maka proses pemadatan dan perekatan berjalan lebih intensif yang menyebabkan rongga antar butir menjadi kecil, sehingga nilai kesarangan dan kelulusannya juga kecil. Oleh karena itu, debit mata air gunung api tua lebih kecil dibandingkan dengan debit mata air pada formasi gunung api muda. Pada formasi batu gamping umur Miosen memiliki debit mata air yang lebih besar dari pada batu gamping yang berumur Pliosen.

Tipologi sistem akuifer endapan gunung api terdiri dari endapan-endapan piroklastika yang umumnya berupa pelapukan yang tebalnya lebih dari 1 meter, sangat berpori, dan tidak kompak berselang-seling dengan lapisan-lapisan aliran lava yang umumnya kedap air. Susunan perlapisan endapan gunungapi tersebut menyebabkan terakumulasinya air tanah yang cukup besar pada daerah kaki gunungapi ditandai dengan munculnya banyak mata air dengan debit cukup besar (Puradimaja *et al.*, 2003).



2.4. Pentingnya Pemilihan Jenis Vegetasi untuk Penghijauan

Penghijauan kawasan resapan di sekitar mata air dapat dijadikan upaya konservasi mata air topografi. Penghijauan dengan beraneka jenis pohon dan tumbuhan dilakukan untuk pemulihan tanah kritis. Teknik penanaman dengan mencontoh fenomena alam (hutan alami) sehingga serasi dan selaras dengan hukum alam (Manan, 1992). Dalam melakukan penghijauan perlu dipahami bahwa hutan merupakan suatu ekosistem kompleks yang tidak hanya tersusun oleh pohon-pohon, namun juga tersusun oleh tanah dan berbagai komponen lain penyusun ekosistem hutan. Penutupan hutan alami yang baik menyediakan aliran air sungai yang baik. Hal ini karena tanah di bawah hutan alami seperti sebuah “spons”, yang menyerap air pada musim hujan dan melepaskannya secara perlahan untuk mensuplai aliran sungai di musim kering. Hutan juga menawarkan perlindungan tanahnya melalui tutupan lapisan kanopinya, sehingga dapat mengurangi erosi dan muatan sedimen sungai.

Pemilihan jenis vegetasi yang tepat untuk penghijauan menjadi hal penting yang harus dilakukan. Komposisi dan luas penutupan vegetasi sangat menentukan jumlah air yang mencapai tanah dan juga mempengaruhi infiltrasi, perkolasi dan drainase dalam, serta kapasitas penyimpanan air di dalam profil tanah. Pengaruh vegetasi dapat bersifat positif dan negatif, dimana vegetasi mengintersepsi air hujan dan mentranspirasikan air yang diperoleh dari zona perakaran, akan tetapi vegetasi dapat juga membantu infiltrasi dengan memperbaiki kondisi tanah. Selain itu, sistem perakaran tumbuhan dapat meningkatkan kecepatan perkolasi dengan membentuk makro pori tanah (Maitre *et al.*, 1999).

Penghijauan dengan penanaman jenis vegetasi *evergreen* cepat tumbuh, biasanya mengurangi jumlah air yang tersedia di suatu kawasan, terutama jika jenis yang ditanam mempunyai kebutuhan kelembaban tinggi di musim kemarau.

Hal ini karena pada umumnya vegetasi pohon lebih banyak menggunakan air daripada jenis-jenis vegetasi pendek karena tingginya nilai evapotranspirasi.

Bruijnzeel (2004) menyatakan bahwa hutan hasil buatan manusia bukan merupakan penutupan lahan terbaik untuk meningkatkan hasil air di hulu sungai.

Hasil penelitian Knight *and* Will (1977) *dalam* Hamilton *and* King (1983)



menunjukkan bahwa setelah 12 tahun pertumbuhan, tegakan muda *Pinus radiata* justru mengurangi banyaknya air yang meresap ke dalam tanah sebesar 165 mm.th⁻¹. Hal yang sama dikemukakan Soedjoko *et al.* (1998) bahwa evapotranspirasi yang terjadi di hutan pinus mencapai kisaran sebesar 1002 - 1253 mm/th atau 29-69 % dari hujan tahunan yang jatuh. Angka tersebut memunculkan suatu keputusan untuk merekomendasikan bahwa pinus dapat dikembangkan pada suatu daerah yang mempunyai tebal hujan 2000 mm/th.

Penanaman jenis tanaman eksotik cepat tumbuh untuk penghijauan dapat menimbulkan ancaman bagi keseimbangan ekosistem. Di Indonesia, tanaman eksotik banyak digunakan sebagai tanaman yang digalakkan untuk penghijauan monokultur. Pada observasi tingkat ekosistem, hutan monokultur seringkali tidak menguntungkan kelestarian alam. Tegakan jati (*Tectona grandis*) sangat rawan kebakaran pada musim kemarau (Hamilton and King, 1983). Menurut Cox (1997) dan Mauseth (1998) penggunaan tanaman eksotik dapat merugikan bagi lingkungan, antara lain karena tidak adanya musuh alami (herbivora, parasit dan penyakit) yang dapat mengendalikan pertumbuhan, perkembangan dan penyebarannya. Selain itu, tanaman eksotik juga mempunyai daya tumbuh cepat dan kadang membawa parasit atau penyakit dari daerah asalnya sehingga berbahaya bagi jenis endemik. Kemampuannya dalam beradaptasi dengan lingkungan seringkali lebih baik daripada jenis endemik, sehingga jenis tersebut mampu menginvasi habitat dengan cepat. Hal ini mengakibatkan jenis endemik terdesak dan akhirnya terbentuk dominansi jenis eksotik dan terjadi penurunan keragaman jenis tanaman endemik di dalam ekosistem tersebut.

Dalam pelaksanaan penghijauan tidak hanya melihat jenis pohon yang ditanam, tetapi perlu memperhatikan keanekaragaman dan kerapatan vegetasi yang pada akhirnya menghasilkan tajuk yang rapat dan berlapis (*multistrata*) dan seresah yang tebal dan menutup seluruh permukaan tanah. Kondisi permukaan tanah yang sedemikian mendorong perbaikan sifat fisik tanah khususnya lapisan atas (*epipedon*), melalui pengkayaan bahan organik, peningkatan aktivitas biologi tanah (akar dan makrofauna). Hasil penelitian di Sumberjaya, Lampung selama 6 tahun menunjukkan pengaruh revegetasi hutan dengan agroforestri berbasis kopi dan kopi monokultur pada limpasan permukaan dan erosi. Penanaman kembali



bekas lahan hutan dengan kopi cenderung menurunkan limpasan permukaan, namun besarnya limpasan permukaan masih jauh lebih tinggi dibanding plot hutan. Artinya, penanaman kopi (sampai 15 tahun) tidak dapat menyamai kondisi hidrologis hutan. Penanaman kopi monokultur tidak dapat memulihkan fungsi hidrologi hutan yang telah hilang bersama lenyapnya pepohonan ketika ditebang. Beberapa sifat fisik tanah yang rusak akibat penggundulan hutan memang ada kecenderungan lebih baik, tetapi khususnya pori makro tanah belum dapat dipulihkan. Penutupan permukaan tanah oleh seresah dan kanopi pohon juga tampak lebih baik jika dilihat dari prosentasi luas penutupan, tetapi ketebalan seresah dan kedalaman kanopi (multistrata) masih jauh di bawah vegetasi hutan (Lestariningsih *et al.*, 2007).

Penghijauan di daerah tropis menawarkan kesempatan untuk restorasi layanan ekosistem, konservasi keanekaragaman hayati, produksi kayu dan penyerapan karbon. Tingkat potensi penggunaan air yang tinggi terkait dengan penghijauan, bagaimana pun akan membutuhkan keseimbangan di antara produksi kayu atau fiksasi karbon dan penggunaan sumber daya air. Pemilihan jenis pohon dilakukan untuk mengontrol penggunaan air jenis pohon penghijauan. Dari hasil penelitian terhadap sepuluh jenis pohon berdaun lebar diketahui tingkat penggunaan air maksimum berkorelasi kuat ($R^2 = 0,65$) dengan diameter pohon dan berkorelasi lemah ($R^2 = 0,34$) dan nyata dengan biomassa di atas tanah. Jenis *Myrica javanica*, *Sweetenia macrophylla*, *Durio zibethinus* dan *Hopea plagata* memiliki tingkat penggunaan air tertinggi. Sedangkan *Gmelina arboria*, *Vitex parviflora*, *Hopea malibato* dan *Shorea contorta* memiliki tingkat penggunaan air rendah (Dierick and Hölscher, 2009).

Penghijauan suatu kawasan menyebabkan perubahan dalam layanan ekosistem yang dihasilkan, baik berupa perubahan penyerapan karbon, kualitas air dan erosi. Penghijauan di daerah resapan dapat mengurangi aliran permukaan (Zhang *et al.*, 2001) dan pengisian air tanah (Benyon *et al.* 2006), sehingga menurunkan air yang tersedia. Selain itu, penghijauan biasanya dapat memperbaiki nilai keanekaragaman hayati (Brockerohoff, 2008). Penghijauan memiliki lebih banyak kesempatan untuk meningkatkan keanekaragaman hayati jika terdiri dari jenis-jenis lokal (Salt *et al.* 2004).



2.5. Analisis *Partial Least Square (PLS)*

Penelitian ini menggunakan teknik *Partial Least Square*. *Partial Least Square (PLS)* pertama kali dikembangkan oleh Herman Wold, beliau adalah guru dari Karl Joreskog (yang mengembangkan SEM). Model ini dikembangkan sebagai alternatif untuk situasi dimana teorinya lemah dan atau indikator yang tersedia tidak memenuhi model pengukuran reflektif. Wold menyebutkan *PLS* sebagai "soft modeling". *PLS* merupakan metode analisis yang powerful karena dapat diterapkan pada semua skala data, tidak membutuhkan banyak asumsi dan ukuran sampel tidak harus besar. *PLS* selain dapat digunakan sebagai konfirmasi teori juga dapat digunakan untuk membangun hubungan yang belum ada landasan teorinya atau untuk pengujian proposisi (Solimun dan Rinaldo, 2009).

Pendekatan *PLS* didasarkan pada pergeseran analisis dari pengukuran estimasi parameter model penelitian pada pengukuran prediksi yang relevan. Sehingga fokus pengukuran seharusnya bergeser dari hanya penaksiran estimasi signifikansi parameter (*structural path* dan *loading factor*) menjadi validitas prediksi. Dasar pengujian signifikansi parameter adalah *resampling* (pengambilan sampel berulang) dengan teknik *predictive sample*, yaitu sintesa *cross-validation* (validasi silang) dan kesesuaian fungsi perspektif: pengamatan (*observable*) atau pengamatan potensial (*potential observable*) jauh lebih relevan daripada estimasi parameter konstruk yang artifisial (Chin, 1997). Tujuan *PLS* terutama untuk estimasi varian konstruk *endogenous* beserta variabel manifestasinya, diistilahkan dengan indikator reflektif (*reflective indicator*), dengan kekhususan lainnya adalah indikator konstruk dapat pula dibentuk dalam bentuk formatif, diistilahkan dengan indikator formatif (*formative indicator*).

Dibandingkan dengan pendekatan *SEM* yang sudah banyak digunakan (dengan menerapkan *software LISREL* dan *AMOS*), *PLS* mampu menghindari dua masalah serius, yaitu:

- (a) Solusi yang tidak dapat diterima (*inadmissible solution*); hal ini terjadi karena *PLS* berbasis varians dan bukan kovarians, sehingga masalah matriks *singularity* tidak akan pernah terjadi. Di samping itu, *PLS* bekerja pada model struktural yang bersifat rekursif, sehingga masalah *un-identified*, *under-identified* atau *over-identified* juga tidak akan terjadi.



(b) Faktor yang tidak dapat ditentukan (*factor indeterminacy*), yaitu adanya lebih dari satu faktor yang terdapat dalam sekumpulan indikator sebuah variabel.

Khusus indikator yang bersifat formatif tidak memerlukan adanya *common factor* sehingga selalu akan diperoleh variabel laten yang bersifat komposit.

Dalam hal ini variabel laten merupakan kombinasi linier dari indikator-indikatornya.

PLS merupakan pendekatan yang lebih tepat untuk tujuan prediksi, hal ini terutama pada kondisi dimana indikator bersifat formatif. Dengan variabel laten berupa kombinasi linier dari indikatornya, maka prediksi nilai dari variabel laten dapat dengan mudah diperoleh, sehingga prediksi terhadap variabel laten yang dipengaruhinya juga dapat dengan mudah dilakukan. Berbeda dengan *SEM*, yang indikatornya bersifat reflektif, sehingga perubahan nilai dari suatu indikator sangat sulit untuk mengetahui perubahan nilai dari variabel laten, sehingga pelaksanaan prediksi sulit dilakukan.

Di dalam *PLS* variabel laten bisa berupa hasil pencerminan indikatornya, diistilahkan dengan indikator reflektif (*refletive indicator*). Disamping itu, juga bisa konstruk dibentuk (formatif) oleh indikatornya, diistilahkan dengan indikator formatif (*formative indicator*). Model reflektif memandang (secara matematis) indikator seolah-olah sebagai variabel yang dipengaruhi oleh variabel laten. Sehingga indikator-indikator sebuah variabel laten seolah-olah dipengaruhi oleh faktor (variabel laten) yang sama, hal ini mengakibatkan bila terjadi perubahan dari satu indikator akan berakibat pada perubahan pada indikator lainnya dengan arah yang sama. Model formatif memandang (secara matematis) indikator seolah-olah sebagai variabel yang mempengaruhi variabel laten. Dalam hal ini memang berbeda dengan model analisis faktor, jika salah satu indikator meningkat, tidak harus diikuti oleh peningkatan indikator lainnya dalam satu konstruk, tapi jelas akan meningkatkan variabel latennya (Ghozali, 2005).

Langkah-langkah pengujian model empiris penelitian berbasis PLS dengan *software SmartPLS* (Ghozali, 2005; Solimun dan Rinaldo, 2009; Chin, 1997) adalah sebagai berikut:

1. Spesifikasi model

Analisis jalur hubungan antar variabel terdiri dari:

a) *Outer model*, yaitu spesifikasi hubungan antara variabel laten dengan indikatornya, disebut juga dengan *outer relation* atau *measurement model*, mendefinisikan karakteristik konstruk dengan *variabel manifestnya*. Model indikator refleksif dapat ditulis persamaannya sebagai berikut:

$$x = \Lambda_x \xi + \epsilon_x$$

$$y = \Lambda_y \eta + \epsilon_y$$

Di mana x dan y adalah indikator untuk variabel laten eksogen (ξ) dan endogen (η). Sedangkan Λ_x dan Λ_y merupakan matriks *loading* yang menggambarkan seperti koefisien regresi sederhana yang menghubungkan variabel laten dengan indikatornya. Residual yang diukur dengan ϵ_x dan ϵ_y dapat diinterpretasikan sebagai kesalahan pengukuran atau *noise*.

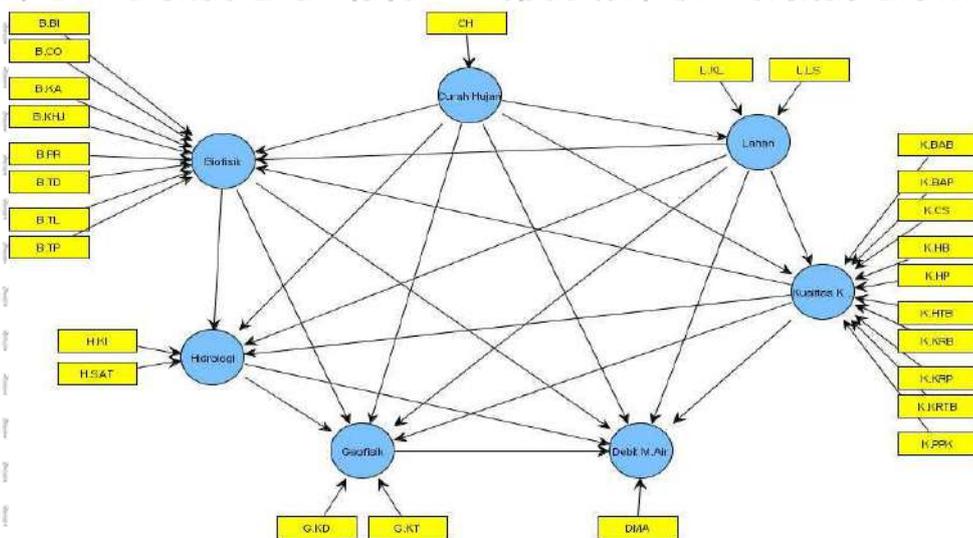
Model indikator formatif persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\xi = \Pi_\xi x + \delta_\xi$$

$$\eta = \Pi_\eta y + \delta_\eta$$

Dimana ξ , η , x , dan y sama dengan persamaan sebelumnya. Π_ξ dan Π_η adalah seperti koefisien regresi berganda dari variabel laten terhadap indikator, sedangkan δ_ξ dan δ_η adalah residual dari regresi.

Spesifikasi model dan analisis jalur penelitian ini adalah:



Gambar 8. Model Hubungan Antar Variabel Penelitian



Outer model pada penelitian ini menggunakan indikator formatif dalam membentuk variabel laten.

b). *Inner model*, yaitu spesifikasi hubungan antar variabel laten (*structural model*), disebut juga dengan *inner relation*, menggambarkan hubungan antar variabel laten berdasarkan teori substansif penelitian. Tanpa kehilangan sifat umumnya, diasumsikan bahwa variabel laten dan indikator atau variabel manifest diskala *zero means* dan unit varian sama dengan satu sehingga parameter lokasi (parameter konstanta) dapat dihilangkan dari model.

Model persamaannya dapat ditulis seperti di bawah ini:

$$\eta = \beta\eta + \Gamma\xi + \zeta$$

Dimana η menggambarkan vektor variabel endogen (dependen), ξ adalah vektor variabel laten eksogen dan ζ adalah vektor residual (*unexplained variance*). Oleh karena PLS didesain untuk model rekursif, maka hubungan antar variabel laten, berlaku bahwa setiap variabel laten dependen η , atau sering disebut *causal chain system* dari variabel laten dapat dispesifikasikan sebagai berikut:

$$\eta_j = \sum_i \beta_{ji} \eta_i + \sum_b \gamma_{jb} \xi_b + \zeta_j$$

Dimana γ_{jb} (dalam bentuk matriks dilambangkan dengan Γ) adalah koefisien jalur yang menghubungkan variabel laten endogen (η) dengan eksogen (ξ). Sedangkan β_{ji} (dalam bentuk matriks dilambangkan dengan β) adalah koefisien jalur yang menghubungkan variabel laten endogen (η) dengan endogen (η); untuk range indeks i dan b . Parameter ζ_j adalah variabel *inner residual*. Pada model PLS Gambar 8, *Inner Model* yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$L = \gamma_1 C + \zeta_1$$

$$K = \gamma_2 C + \beta_1 L + \zeta_2$$

$$B = \gamma_3 C + \beta_2 L + \beta_3 K + \zeta_3$$

$$H = \gamma_4 C + \beta_4 L + \beta_5 K + \beta_6 B + \zeta_4$$

$$G = \gamma_5 C + \beta_7 L + \beta_8 K + \beta_9 B + \beta_{10} H + \zeta_5$$

$$D = \gamma_6 C + \beta_{11} L + \beta_{12} K + \beta_{13} B + \beta_{14} H + \beta_{15} G + \zeta_6$$

Dimana γ adalah *inner weight* pengukuran dari variabel eksogen ke variabel endogen, β adalah *inner weight* pengukuran dari variabel endogen ke endogen, dan ζ adalah kesalahan (*galat*) *Inner Model*.

2. Evaluasi model

Model struktural atau *inner model* dievaluasi dengan melihat persentase varian yang dijelaskan yaitu dengan melihat R^2 untuk konstruk laten dependen dengan menggunakan ukuran *Stone-Geisser Q Square test* dan juga melihat besarnya koefisien jalur strukturalnya. Stabilitas dari estimasi ini dievaluasi dengan menggunakan uji t-statistik yang didapat lewat prosedur *bootstrapping*.

Goodness of Fit Model diukur menggunakan *R-square* variabel laten dependen dengan interpretasi yang sama dengan regresi; *Q-Square predictive relevance* untuk model struktural, mengukur seberapa baik nilai observasi dihasilkan oleh model dan juga estimasi parameternya. Nilai *Q-square* > 0 menunjukkan model memiliki *predictive relevance*; sebaliknya jika nilai *Q-Square* ≤ 0 menunjukkan model kurang memiliki *predictive relevance*.

Perhitungan *Q-Square* dilakukan dengan rumus:

$$Q^2 = 1 - (1 - R_1^2)(1 - R_2^2) \dots (1 - R_p^2)$$

dimana $R_1^2, R_2^2, \dots, R_p^2$ adalah *R-square* variabel endogen dalam model persamaan.

3. Pengujian Hipotesis

Pengujian hipotesis (β, γ , dan λ) dilakukan dengan metode *resampling Bootstrap*. Statistik uji yang digunakan adalah t-statistik atau uji t. Dengan demikian asumsi data terdistribusi bebas (*distribution free*), tidak memerlukan asumsi distribusi normal, serta tidak memerlukan sampel yang besar (direkomendasikan sampel minimum 30).

Akan tetapi, terdapat satu asumsi dalam model PLS yang harus dipenuhi, yaitu asumsi linieritas. Asumsi linieritas yaitu asumsi yang menghendaki semua hubungan berbentuk linier. Uji linearitas, untuk memeriksanya dapat dilakukan dengan membuat diagram pencar (*scatter diagram*) atau pendekatan *curve fit* (pada *software SPSS*). Pengujian asumsi linieritas menggunakan metode *curve fit* yang dilakukan dengan *software SPSS*. Rujukan yang digunakan adalah prinsip



parsimony, yaitu (1) bilamana model linier signifikan, atau (2) bilamana seluruh model yang mungkin adalah non signifikan. Spesifikasi model yang digunakan sebagai dasar pengujian adalah model linier, kuadratik, kubik, *inverse*, *logarithmic*, *power*, *S*, *compound*, *growth* dan *exponential*. Dua ketentuan tersebut mengindikasikan asumsi linieritas terpenuhi.

III. METODE PENELITIAN

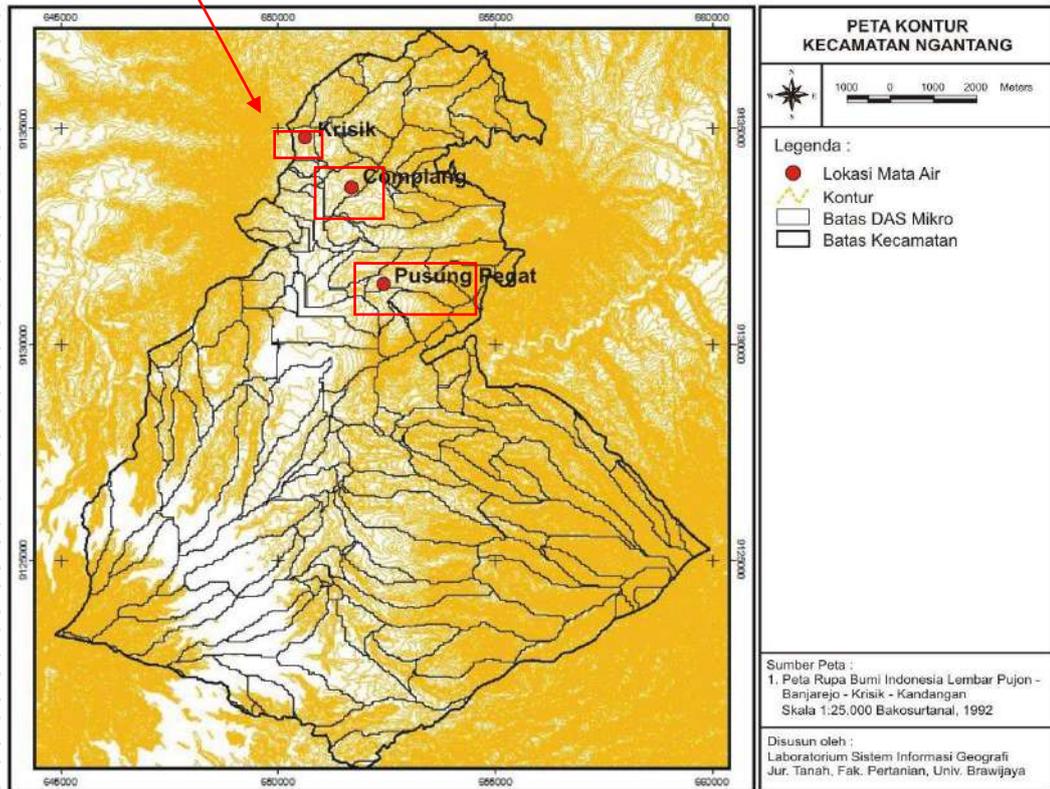
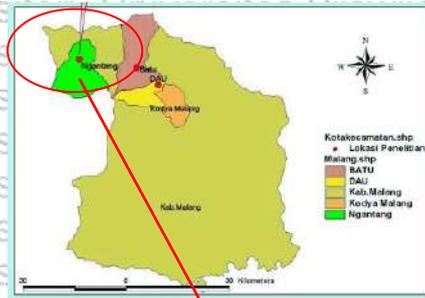
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Serangkaian penelitian eksploratif deskriptif dilakukan di Kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang. Penentuan tiga contoh mata air yang dijadikan lokasi penelitian mengacu pada hasil seleksi mata air di Kecamatan Ngantang (Yulistyarini *et al.*, 2009). Seleksi mata air didasarkan pada kesamaan struktur geologi, kesamaan morfologi terbentuknya mata air (terbentuk karena adanya perubahan ketinggian tempat), besarnya debit (kurang dari 5 l.det^{-1}), terjadinya fluktuasi debit tergantung musim, perkiraan karakteristik akuifer dan kondisi ekosistem di sekitar mata air. Suatu mata air berdebit kecil menghasilkan debit berkisar antara $0,4\text{--}5 \text{ l.det}^{-1}$ (Murdiono, 1972). Sedangkan karakteristik akuifer diperkirakan dari data fluktuasi debit, muka air tanah dan curah hujan. Untuk air tanah dangkal tidak terkekang, fluktuasi muka air tanahnya sangat dipengaruhi oleh fluktuasi curah hujan. Muka air tanah akan bergerak naik setelah adanya curah hujan yang cukup besar (Takahashi *et al.*, 2000 dalam Sumawijaya *et al.*, 2006). Berdasar pengukuran kedalaman air sumur penduduk di sekitar mata air di Ngantang, terjadi perbedaan kedalaman muka air tanah pada musim kemarau dan penghujan (Yulistyarini *et al.*, 2009). Kondisi ekosistem digambarkan oleh Sistem Penggunaan Lahan (SPL) di sekitar mata air.

Dari hasil survei ditentukan mata air yang dijadikan sampel penelitian, yaitu mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat (Tabel 5).

Tabel 5. Tiga mata air berdebit kecil di Kecamatan Ngantang

No	Nama mata air	Lokasi		Administrasi (Dusun, Desa)
		LS	BT	
1	Krisik	07°49'29,8"	112°21'58,2"	Kedawung, Jombok
2	Complang	07°50'07,3"	112°22'32,6"	Sumber Gondo, Waturejo
3	Pusung Pegat	07°51'20,5"	112°22'57,4"	Sumber Mulyo, Sumber Agung



Gambar 9. Lokasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat di Kecamatan Ngantang

Delineasi daerah resapan mata air dilakukan di Laboratorium Sistem Informasi Geografis (SIG), Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, yang dilanjutkan dengan survei di lapangan. Analisis biofisik tanah dilakukan di Laboratorium Fisika dan Biologi Tanah, Fakultas Pertanian. Sedangkan analisis geofisik mata air dilakukan di Laboratorium Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya. Waktu penelitian dimulai bulan Juli 2009 hingga Desember 2010. Secara rinci kerangka operasional penelitian terdapat pada Gambar 10.



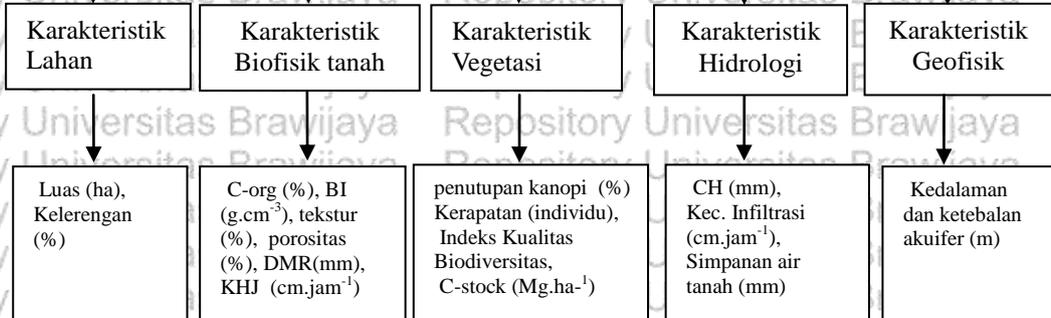
PENELITIAN TAHAP 1.

Identifikasi dan karakterisasi hidrogeomorfologi mata air (Krisik, Complang dan Pusung Pegat)

- struktur lapisan bawah tanah
- kedalaman dan ketebalan akuifer
- pola curah hujan dan debit mata air, serta hubungannya

PENELITIAN TAHAP 2.

Karakterisasi daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat



PENELITIAN TAHAP 3.

Eksplorasi hubungan karakteristik lahan, geofisik, biofisik tanah dan vegetasi di daerah resapan dengan debit mata air menggunakan analisis *Multivariate (PLS)*

Model hubungan karakteristik lahan, biogeohidrofisik daerah resapan dan vegetasi dengan debit mata air

PENELITAN TAHAP 4.

Optimalisasi karakteristik vegetasi dan biogeohidrofisik daerah resapan untuk memaksimalkan debit mata air

Model optimalisasi daerah resapan mata air untuk memaksimalkan debit

Gambar 10. Kerangka Operasional Penelitian



3.2. Alat dan Bahan

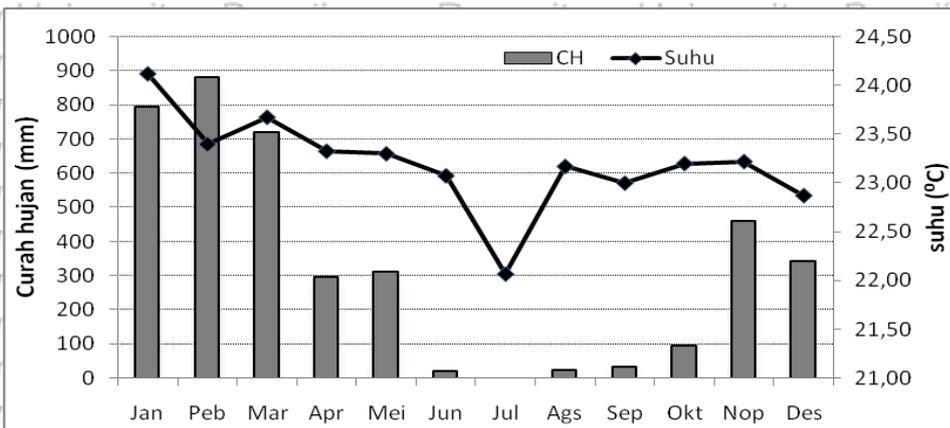
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: *Global Position System (GPS)*, Klinometer, roll meter, *sketmatch*, peta topografi Kecamatan Ngantang, peta Geologi lembar Malang 1: 100.000, Peta Hidrogeologi Lembar Kediri 1: 250.000.

3.3. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

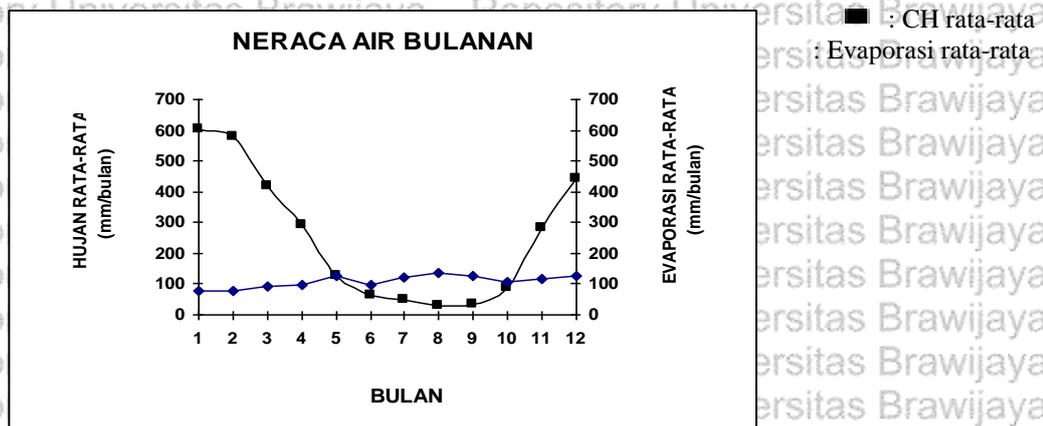
Kecamatan Ngantang merupakan salah satu wilayah yang terletak di Sub Daerah Aliran Sungai (DAS) Konto berada pada ketinggian antara 600-800 m dpl. Sub DAS Konto merupakan bagian DAS Brantas dengan luas wilayah 237 km² (10% dari total DAS Brantas Hulu). Kecamatan ini terletak pada 7°46'47" - 8°17'18" LS dan 112°18'18" - 112°55'55" BT.

3.3.1. Kondisi Iklim

Daerah ini termasuk beriklim muson tropis, yang dicirikan oleh adanya musim hujan dan musim kemarau yang tegas dan suhu udara yang selalu panas sepanjang tahun. Daerah penelitian ini termasuk kawasan basah dengan curah hujan tahunan berkisar antara 2.200 mm sampai 3.880 mm, dan rata-rata 3.000 mm per tahun. Dari jumlah hujan tersebut ternyata lebih dari 90% jatuh hanya selama 6 bulan, antara bulan Nopember sampai dengan April dan kurang dari 10% tersebar antara bulan Mei sampai dengan Oktober. Terdapat perbedaan sifat yang jelas antara musim hujan dan musim kemarau. Suhu udara di kawasan ini termasuk sedang atau sejuk, dengan rata-rata suhu harian sebesar 23,0 °C, yang hampir merata sepanjang tahun. Suhu terendah yang tercatat dalam sepuluh tahun terakhir sebesar 20,9 °C dan suhu tertinggi 24,1 °C, sehingga amplitudo (perbedaan suhu terendah dan tertinggi) $\leq 5^{\circ}\text{C}$ (Gambar 11).



Gambar 11. Rata-rata Curah Hujan Bulanan (mm) dan Rata-rata Suhu Udara selama tahun 1997 hingga 2009 (Sumber: Kurniawan *et al.*, 2010 dan Badan Pengelolaan DAS Bango, 2009)



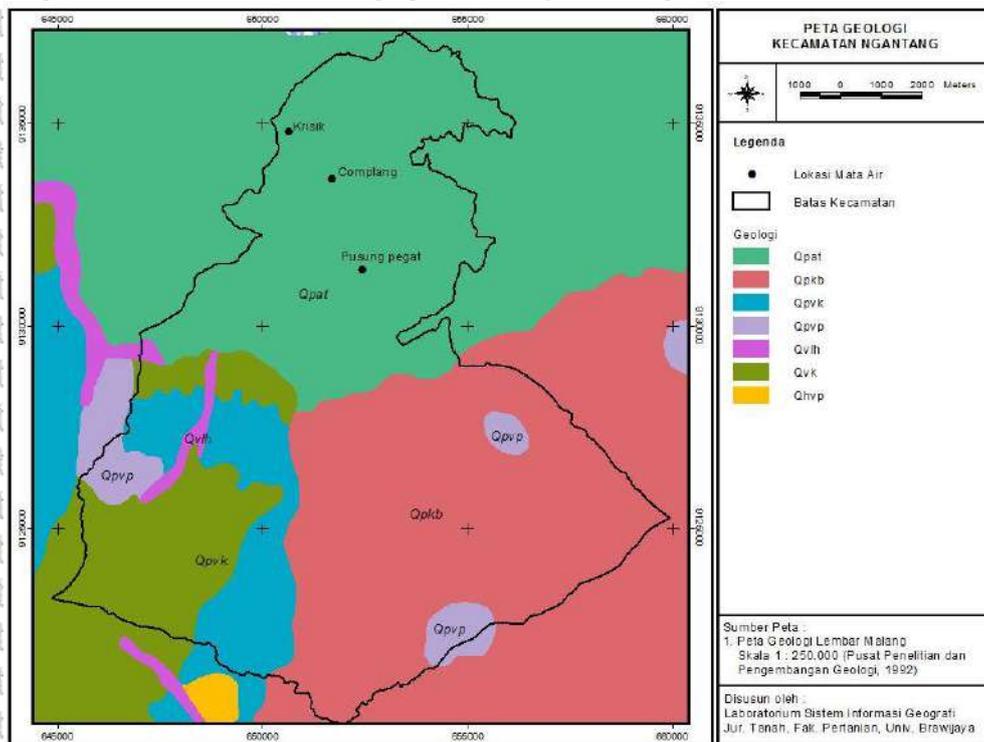
Gambar 12. Neraca Air Bulanan di Kecamatan Ngantang

Neraca air tahunan (selisih antara curah hujan dan penguapan) selama setahun di kawasan ini menunjukkan surplus sebesar 1.745 mm. Surplus air berlangsung selama 6 bulan dan terjadi antara bulan Nopember sampai dengan April, sedangkan selama empat bulan (Juni sampai dengan September) terjadi defisit (Gambar 12). Sementara itu pada bulan Mei dan bulan Oktober tidak menentu, sehingga berpeluang bisa terjadi surplus atau defisit dengan tingkat peluang yang sama besarnya.

3.3.2. Geologi dan hidrogeologi

Kecamatan Ngantang terletak pada zona Solo yang ditempati oleh serangkaian gunung berapi raksasa jaman kuartar dan dataran intervulkanik.

Geologi wilayah ini digolongkan dalam tiga kompleks, yaitu kompleks Kawi-Butak, kompleks Kelud dan kompleks Anjasmoro-Parangklakah-Kelet-Amping-amping. Gugusan pegunungan Anjasmoro merupakan kompleks vulkanik tertua di Ngantang. Bagian dasar G. Anjasmoro terdiri dari lapisan basaltik yang tebal dan luas serta dari aliran lava intermediate. Lapisan ini menutupi batuan dan endapan yang lebih tua dari geantiklin tersier di bagian selatan dan geosiklin tersier di bagian utara. Lapisan-lapisan tersebut adalah akibat dari letusan celah. Namun demikian, di atas aliran lava terbentuk beberapa kerucut vulkanik. Kemudian sebagai akibat dari sesar dan lipatan, G. Anjasmoro pecah menjadi blok-blok yang tidak beraturan (Anonimous,1984).

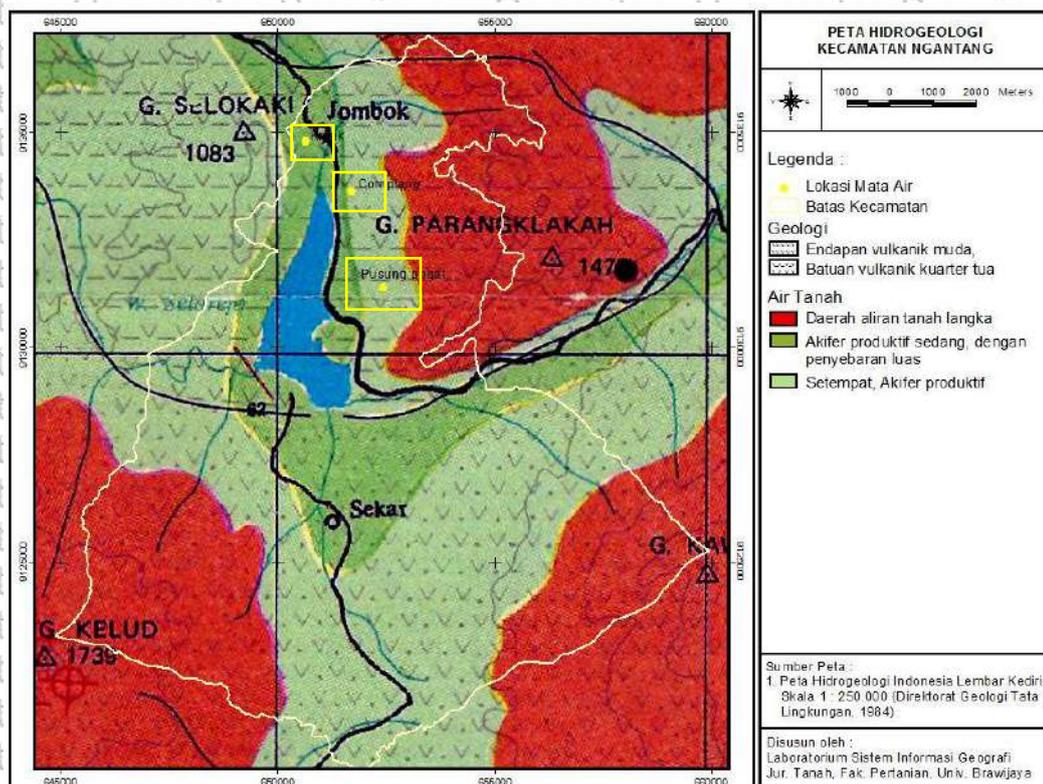


Gambar 13. Peta geologi Kecamatan Ngantang

Berdasar peta Geologi lembar Malang 1 : 100.000, ketiga mata air terletak pada struktur geologi Batuan Gunung api Anjasmara Tua (Qpat), yang diduga sebagai alas dari Gunung api Kuarter Bawah (Gambar 13). Qpat merupakan endapan piroklastik yang tertua di lembar Malang, diperkirakan berumur Plistosen Awal hingga Tengah. Batuan gunung api ini tertindih oleh Batuan Gunung api Anjasmara Muda dan Batuan Gunung api Panderman. Umumnya, batuan Qpat

sudah pejal dan termampatkan, bersusunan andesit hingga basal dan sebagian terubah, terdiri atas breksi gunung api, lava, tuf dan retas (Santosa dan Atmawinata, 1992).

Berdasar Peta Hidrogeologi Lembar Kediri 1: 250.000, lokasi penelitian terdiri dari dua wilayah akuifer (Gambar 14), yaitu akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir. Akuifer tersebut merupakan akuifer produktif lokal, dimana akuifer ini memiliki keterusan sangat beragam, kedalaman muka air tanah bebas umumnya dalam dan mata air berdebit kecil. Terdapat pula akuifer dengan produktif sedang dan penyebaran luas. Akuifer ini memiliki keterusan sangat beragam, kedalaman muka air tanah bebas umumnya dalam, debit sumur kurang dari 5 l.detik⁻¹ (Poespowardojo, 1984).



Gambar 14. Peta Hidrogeologi Kecamatan Ngantang

Dalam laporan survei tanah di Ngantang disebutkan bahan endapan/sedimen vulkanik tebal yang menutupi DAS Konto berperan sebagai akuifer utama. Abu vulkanik dengan tekstur berlempung dan tanah yang terbentuk dari



bahan ini bersifat sangat porous, mempunyai permeabilitas tinggi dan merupakan penahan air sangat baik. Lereng bagian atas kompleks vulkanik di daerah ini cenderung bersifat sangat porous, mempunyai permeabilitas tinggi dan merupakan penahan air yang sangat baik sehingga tidak ada limpasan permukaan. Batuan andesitik yang rapuh dan melapuk maupun hasil sortasi bahan pumice kasar juga merupakan media penahan air. Di lain pihak breksi dan konglomerat vulkanik yang kompak dan agak pejal kurang baik sebagai penahan air dan bahkan tuf vulkanik (abu yang tersemen dan mantap) merupakan penahan air yang jelek meskipun porositas cukup tinggi. Sedangkan agak ke bawah bagian lereng, bahan sarang tersebut diselingi dengan lapisan yang kurang permeabel, sehingga muncul mata air. Sebagian besar mata air di Ngantang dijumpai pada lapisan breksi dan konglomerat (bahan lahar yang tersemen dan tertimbun). Selain itu mata air juga terjadi di bawah singkapan batuan pumice (batu apung) yang tersusun baik di atas tuf yang kurang permeabel atau abu yang kompak, umumnya dijumpai di lereng G. Kelud (Anonymous, 1984).

3.3.3. Geomorfologi (bentuk lahan dan kelerengan)

Secara geomorfologis, Kecamatan Ngantang terletak pada zone Solo, yaitu suatu dataran vulkanik yang memanjang di antara geantiklin tersier dari bukit kapur di bagian selatan (sebelah selatan Karangates) dan geosiklin dari Jawa bagian utara (pegunungan Rembang dan Madura) (Anonymous, 1984). Terdapat tiga bentuk lahan di wilayah ini, yaitu dataran, perbukitan dan pegunungan. Dataran yang terbentuk sudah tererosi/ tertoreh melalui proses pengikisan tanah yang berlangsung dalam jangka waktu sangat lama, sehingga permukaannya menjadi bergelombang sampai curam dan sangat curam dengan kelerengan antara 3-75%. Morfologi daerah penelitian umumnya kasar, lereng terjal, lembah sempit dan dalam.

3.3.4. Jenis Tanah

Berdasarkan Kunci Taksonomi Tanah (USDA, 1999), tanah di lokasi penelitian terdiri dari dua ordo tanah, yaitu *Incepticol* (*Great Soil Group Dystropepts* dan *Eutropepts*) dan *Alfisol* (*Great Soil Group Tropudalfs*). Inceptisol memiliki solum tanah bervariasi mulai agak dalam (60 – 90 cm) hingga dalam (90



– 120 cm). Inceptisol memiliki sifat dan karakter yang beragam, terutama berkaitan dengan bahan induk dan faktor perkembangan yang mempengaruhinya. Tingkat perkembangan yang berbeda juga mempengaruhi sifat dan karakter tanahnya, namun secara umum Inceptisol yang ditemukan telah mengalami perkembangan dengan penciri adanya horison kambik. Sedangkan tanah-tanah yang termasuk dalam ordo Alfisol adalah tanah yang telah mengalami proses *lessivage* sehingga terjadi peningkatan kandungan liat halus pada horison bawah yang sering dicirikan oleh adanya selaput liat pada penampang tanah lapisan bawah, dan kejenuhan basa $> 35\%$. Pada umumnya, tanah yang diidentifikasi sebagai Alfisol di daerah survei memiliki kandungan liat yang cukup tinggi dan agak keras.

3.3.5. Sejarah Penggunaan Lahan di Kecamatan Ngantang

Di daerah Sub DAS Konto telah terjadi alih guna hutan menjadi berbagai macam penggunaan lahan lainnya sejak 50-60 tahun yang lalu. Hutan alami ditebang dan dibakar, ditanami tanaman semusim secara intensif sehingga mempercepat degradasi lahan yang terjadi di tahun 1930-an. Pada tahun 1942 lahan bekas hutan tersebut direhabilitasi dengan menanam pohon dadap dan dikombinasi dengan jagung yang selanjutnya diperkaya dengan penanaman kopi dan panili. Selanjutnya di awal tahun 1980-an hingga sekarang diversitas pohon yang ditanam meningkat dengan masuknya beberapa jenis pohon bernilai ekonomi tinggi dari jenis kayu-kayuan (puspa, sengon, waru dan cempaka) dan pohon buah-buahan (durian, alpukad, kelapa, rambutan, cengkeh).

3.4. Pelaksanaan Penelitian

3.4.1. Identifikasi dan karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Untuk mempelajari karakteristik mata air dapat digunakan pendekatan hidrogeomorfologi (Santosa, 2006). Identifikasi dan karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat dilakukan dengan mengumpulkan data morfologi (posisi geografis, kelerengan dan ketinggian tempat), data hidrologi (debit dan curah hujan), dan data geofisik (struktur batuan penyusun mata air).



Debit mata air diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan (diuraikan di Bab IV). Oleh karena sumber utama air pada mata air adalah air hujan, maka data curah hujan digunakan untuk mengkarakterisasi hidrologi mata air. Data curah hujan diperoleh dari Balai Sumber Daya Air Bango–Gedangan Malang, dengan pengukuran curah hujan dilakukan di Stasiun Jombok dan Stasiun Ngantang. Sedangkan struktur batuan penyusun tiga mata air ditentukan dengan analisis struktur lapisan bawah permukaan tanah, dengan metode geolistrik konfigurasi *Schlumberger* (diuraikan di Bab IV).

3.4.2. Karakterisasi Daerah Resapan Mata Air : Lahan, Biogeohidrofisik dan Vegetasi Mata Air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Penelitian ini terdiri dari analisis karakteristik lahan (luas daerah resapan dan kelerengan), geofisik (akuifer), biofisik tanah, vegetasi dan karakteristik hidrologi daerah resapan mata air. Sebelum kegiatan dilaksanakan, dilakukan deliniasi daerah resapan mata air dengan berdasarkan peta tematik DAS Mikro Kecamatan Ngantang.

3.4.2.1. Karakterisasi Lahan

Dari hasil deliniasi daerah resapan diperoleh informasi mengenai Sistem Penggunaan Lahan (SPL) dan luas masing-masing SPL dalam daerah resapan mata air. Estimasi luas daerah resapan mata air dan luas setiap SPL yang ada di daerah tersebut ditentukan dengan program *Arcview 3.2*. Sedangkan kelerengan daerah resapan ditentukan dengan berdasarkan peta kelerengan Ngantang, yaitu dengan meletakkan data koordinat masing-masing SPL dalam daerah resapan mata air di peta tersebut.

3.4.2.2. Karakterisasi geofisik

Karakteristik geofisik diperoleh dari hasil geolistrik struktur lapisan bawah mata air. Variabel yang diamati meliputi kedalaman dan ketebalan akuifer mata air. Metode selengkapnya disajikan pada Bab IV.

3.4.2.3. Karakterisasi biofisik tanah

Karakterisasi biofisik tanah dilakukan dengan pengambilan contoh tanah pada setiap SPL di daerah resapan mata air. Terlebih dulu dilakukan pembuatan

profil tanah, untuk mengetahui batas lapisan-lapisan tanah. Contoh tanah diambil pada berbagai kedalaman, sesuai dengan profil tanahnya. Contoh tanah utuh digunakan untuk penentuan kemantapan agregat, porositas, Berat Isi (BI) dan Konduktivitas Hidroulik Jenuh (KHJ), sedangkan contoh tanah terganggu digunakan untuk penentuan tekstur tanah dan kandungan C-organik tanah. Contoh tanah dianalisis di Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya, dengan metode seperti yang tercantum pada Tabel 6.

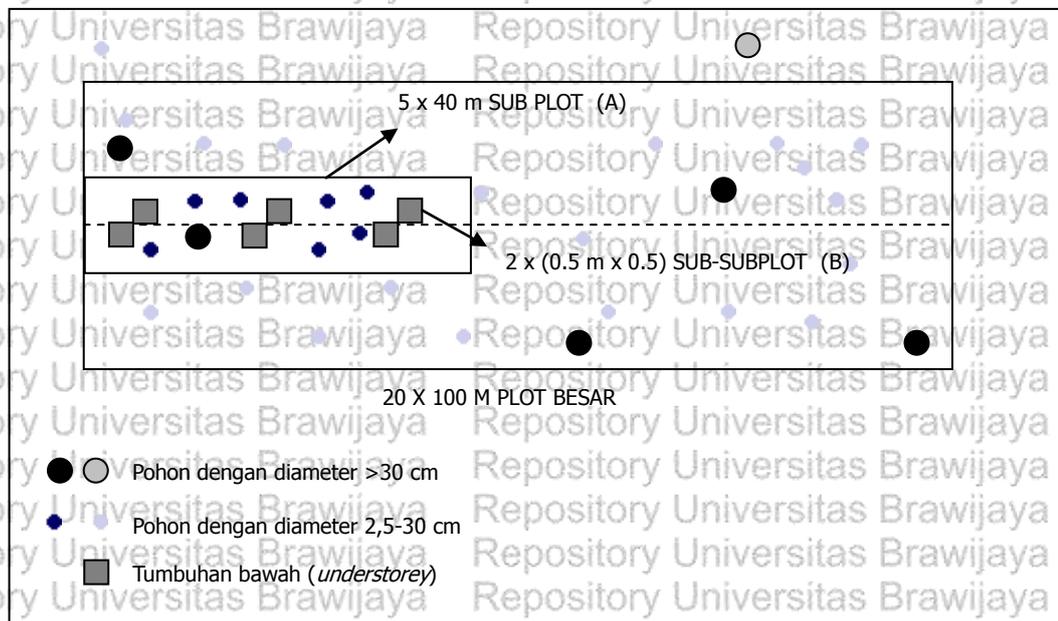
Tabel 6. Karakteristik biofisik tanah dan metode analisisnya.

No.	Analisis	Metode
1.	C-organik	<i>Walkey and Black</i>
2.	Tekstur	Metode Pipet
3.	Porositas total	$P = (1 - BI / BJ) \times 100 \%$
4.	KHJ	<i>Constant Head</i>

3.4.2.4. Karakterisasi Vegetasi

Karakterisasi vegetasi dilakukan pada tiap SPL, yang berpotensi sebagai daerah resapan mata air. Pengumpulan data dilakukan dengan membuat plot contoh, yang ditentukan dengan cara *random sampling*. Oleh karena SPL di daerah resapan mata air sebagian besar berupa agroforestri atau hutan produksi, maka dibuat plot contoh dengan ukuran berbeda untuk masing-masing kelas tumbuhan (Hairiah dan Rahayu, 2007). Plot ukuran 20 m x 100 m dibuat untuk kelas pohon dengan diameter lebih dari 30 cm. Plot ukuran 5 m x 40 m dibuat untuk kelas belta dengan diameter 2,5-30 cm, dan plot ukuran 0,5 m x 0,5 m untuk kelas tumbuhan bawah (Gambar 15).

Data yang dicatat meliputi kelimpahan (jumlah individu per jenis), tinggi (m) dan diameter setinggi dada (cm). Data tersebut digunakan untuk menentukan stratifikasi, diversitas dan struktur komunitas tumbuhan di daerah resapan mata air. Selain itu, dilakukan pula penghitungan cadangan karbon (*C stock*) masing-masing SPL di daerah resapan mata air dengan menggunakan metoda *RaCSA* (*Rapid Carbon Stock Assessment*) yang dikembangkan oleh *ICRAF* (Hairiah dan Rahayu, 2010).



Gambar 15. Penentuan plot pengamatan tiap-tiap SPL (Hairiah dan Rahayu, 2007)

3.4.2.5. Karakterisasi Hidrologi

Karakterisasi hidrologi dilakukan dengan pengamatan kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah. Kecepatan infiltrasi konstan diukur berdasarkan neraca air dengan memberikan curah hujan buatan pada plot 0,5 m x 1 m, diulang sebanyak 3 kali. Kecepatan infiltrasi tanah diperoleh dengan cara menghitung selisih curah hujan dengan limpasan permukaan dan dinyatakan dalam cm jam^{-1} . Kecepatan infiltrasi yang disajikan adalah kecepatan infiltrasi konstan saat tanah dalam kondisi jenuh (Widiyanto *et al.*, 2004).

Simpanan air tanah dihitung berdasarkan kelembaban tanah (kadar air tanah (KA) dikalikan kedalamannya. Pengamatan dilakukan dua kali, yaitu pengukuran KA saat puncak musim hujan dan KA saat puncak musim kemarau.

Dengan asumsi bahwa KA pada saat tersebut berada pada kondisi yang konstan. Simpanan air tanah yang dihitung adalah simpanan air tanah pada kedalaman 1 m, diperoleh dari penjumlahan simpanan air tanah per kedalaman sesuai dengan proporsinya. Dengan demikian diperoleh data simpanan air tanah pada waktu musim kemarau dan simpanan air tanah pada waktu musim penghujan (mm).



3.4.3. Eksplorasi hubungan karakteristik lahan, biogeohidrofisik, vegetasi di daerah resapan mata air dan debit mata air dengan Analisis Multivariate (*Partial Least Square/ PLS*)

Debit mata air ditentukan oleh curah hujan (mm) dan karakteristik daerah resapannya. Karakteristik daerah resapan mata air terdiri dari variabel geofisik, lahan, biofisik tanah, vegetasi dan hidrologi. Variabel karakteristik Lahan terdiri dari dua indikator yaitu kelerengan (%) dan luas SPL (ha). Variabel karakteristik Geofisik terdiri dari dua indikator yaitu kedalaman akuifer (m) dan ketebalan akuifer (m). Variabel karakteristik Biofisik tanah terdiri enam indikator, yaitu C-organik (%), BI (g.cm^{-3}), porositas (%), tekstur (persentase kandungan pasir, debu dan liat), kemantapan agregat (mm), dan KHJ (cm.jam^{-1}). Variabel karakteristik Vegetasi terdiri dari tujuh indikator yaitu Indeks Kualitas Biodiversitas, penutupan kanopi (%), kerapatan pohon (individu per daerah resapan), belta (individu per daerah resapan) dan tumbuhan bawah (individu per daerah resapan) dan *C-stock* (Mg.ha^{-1}). Variabel karakteristik Hidrologi mata air terdiri dua indikator yaitu kecepatan infiltrasi (cm.jam^{-1}) dan simpanan air tanah (mm).

Untuk mengetahui variabel mana yang paling berpengaruh terhadap debit mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat di Kecamatan Ngantang, maka dilakukan terlebih dulu analisis model hubungan di antara variabel-variabel tersebut dengan analisis multivariate dan menggunakan *open source software Smart PLS (Partial Least Square)*. Langkah-langkah pengujian model empiris penelitian berbasis PLS dengan *software Smart PLS* sudah dikemukakan pada Bab II, dengan ringkasan sebagai berikut:

1. Spesifikasi model, yang merupakan analisis jalur hubungan antar variabel terdiri dari *outer model* (hubungan antara variabel laten dengan indikatornya) dan *inner model* (hubungan antar variabel laten berdasarkan teori substansif penelitian).
2. Evaluasi model, model struktural atau *inner model* dievaluasi dengan melihat persentase varian yang dijelaskan yaitu dengan melihat R^2 . Stabilitas dari estimasi ini dievaluasi dengan menggunakan uji t-statistik yang didapat lewat prosedur *bootstrapping*. *Goodness of Fit Model* diukur menggunakan *R-square* variabel *latent dependent* dengan interpretasi yang sama dengan regresi; *Q-*

Q-square predictive relevance untuk model struktural, mengukur seberapa baik nilai observasi dihasilkan oleh model dan juga estimasi parameternya. Nilai $Q\text{-square} > 0$ menunjukkan model memiliki *predictive relevance*; sebaliknya jika nilai $Q\text{-square} \leq 0$ menunjukkan model kurang memiliki *predictive relevance*.

Perhitungan $Q\text{-Square}$ dilakukan dengan rumus:

$$Q^2 = 1 - (1 - R_1^2) (1 - R_2^2) \dots (1 - R_p^2)$$

dimana $R_1^2, R_2^2, \dots, R_p^2$ adalah *R-square* variabel endogen dalam model persamaan.

3. Pengujian Hipotesis

Pengujian hipotesis (β , γ , dan λ) dilakukan dengan metode *resampling Bootstrap*. Statistik uji yang digunakan adalah t-statistik atau uji t.

3.4.4. Maksimalisasi debit mata air berdasarkan optimalisasi karakteristik vegetasi dan biogeohidrofisik daerah resapannya dengan *Response Surface Analysis*

Analisis *Response Surface* adalah suatu teknik analisis statistika yang digunakan untuk memperoleh nilai optimalisasi dari suatu respon yang diprediksi oleh satu atau beberapa variabel prediktor. Dalam penelitian ini, yang akan didapatkan optimalisasi adalah variabel respon Debit Mata Air (D). Analisis optimalisasi didasarkan pada hubungan antar variabel yang signifikan (hasil analisis *PLS*). Hasil analisis ini adalah nilai dugaan minimum dan maksimum variabel respon, serta persamaan optimalisasi dari variabel respon.

IV. IDENTIFIKASI DAN KARAKTERISASI MATA AIR KRISIK, COMPLANG DAN PUSUNG PEGAT DI KECAMATAN NGANTANG, KABUPATEN MALANG

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat berdasarkan morfologi, struktur batuan penyusun dan debitnya. Pengumpulan data morfologi mata air terdiri dari posisi geografis dan ketinggian tempat diukur dengan GPS, sedangkan kelerengan ditentukan dari peta kelerengan. Data geofisik berupa struktur batuan penyusun mata air dan karakteristik akuifer ditentukan dengan metode geolistrik resistivitas konfigurasi *Schlumberger*. Pengumpulan data hidrologi terdiri dari debit dan curah hujan dilakukan dengan pengamatan langsung dan data sekunder. Hasil karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menunjukkan ketiga mata air muncul karena perubahan kelerengan, di kaki bukit pada dataran rendah dan dikategorikan sebagai mata air kontak. Akuifer ketiga mata air berupa batuan pasir tidak terkonsolidasi, merupakan akuifer dangkal dengan kedalaman 0,93-1,71 m dan ketebalan mencapai 0,9 – 12,59 m. Ketiga mata air termasuk mata air berdebit kecil dan berfluktuasi, dimana fluktuasi debit mata air Krisik tidak sebesar mata air Complang dan Pusung Pegat. Debit mata air Krisik mengalami penurunan, tetapi tidak sampai mengering. Sedangkan debit mata air Complang dan Pusung Pegat mengering hingga 1 dan 4 bulan.

Key words : karakteristik, mata air, morfologi, akuifer, debit

4.1. PENDAHULUAN

Mata air merupakan pelepasan (*discharge*) air tanah yang mengalir keluar secara alami menuju permukaan tanah atau batuan. Asal air pada mata air seluruhnya berasal dari air bawah tanah (*ground water*) (Särkkä *et al.*, 1998).

Berdasarkan sebab terjadinya, mata air diklasifikasikan menjadi dua, yaitu mata air yang dihasilkan oleh tenaga *non gravitasi* dan mata air yang dihasilkan tenaga gravitasi. Mata air non gravitasi meliputi mata air vulkanik, mata air celah, mata air hangat dan mata air panas. Sedangkan mata air gravitasi diklasifikasikan menjadi beberapa tipe, yaitu mata air depresi (*depression spring*), yang terbentuk bila permukaan tanah terpotong oleh topografi; mata air kontak (*contact spring*) terjadi bila lapisan lulus air terletak di atas lapisan kedap air; mata air artesis (*artesian spring*) yang keluar dari akuifer tertekan dan mata air turbuler (*turbulence spring*) yang terdapat pada saluran-saluran alami pada formasi kulit bumi, seperti goa lava atau *joint* (Todd and Mays, 2005).

Distribusi pemunculan mata air berhubungan dengan keterdapatan curah hujan, karakteristik hidrologi permukaan, karakteristik akuifer dan struktur geologinya (Tolman, 1937). Sedangkan Santosa (2006) menyatakan faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik dan distribusi mata air, antara lain perubahan morfologi lereng, proses geomorfologis, jenis batuan dan struktur geologis. Perubahan morfologi ditandai oleh adanya tekuk lereng atau pemotongan topografi yang menyebabkan pemunculan air tanah dari dalam akuifer ke permukaan bumi, baik secara terpusat maupun rembesan. Demikian juga kedudukan antara satu perlapisan batuan dengan perlapisan yang lain dan struktur geologi seperti patahan, retakan, maupun perlipatan, merupakan faktor lain pengontrol pemunculan dan pola sebaran mata air. Pemunculan mata air di suatu tempat, juga tidak terlepas dari kedudukan lokasi itu sendiri, kaitannya dengan tenaga gravitasi yang mempengaruhinya maupun energi-energi lain, seperti tekanan hidrostatik yang kuat akibat struktur perlapisan batuan yang sangat tebal (*geyser*) atau akibat dorongan energi magma pada daerah vulkanik. Proses-proses geomorfologis yang bekerja pada suatu daerah sangat menentukan dinamika bentang lahan di wilayah tersebut. Hal ini secara langsung maupun tidak langsung, dalam jangka waktu yang lama akan mempengaruhi keberadaan dan karakteristik mata air di daerah tersebut.

Salah satu wilayah yang mempunyai potensi mata air besar adalah lereng gunung api. Kecamatan Ngantang berada di antara tiga gunung api, yaitu Gunung Anjasmoro, G. Kelud dan G. Kawi-Butak. Tercatat sebanyak 71 mata air muncul secara berkelompok di wilayah ini, terletak di dataran rendah dengan ketinggian tempat sekitar 500-700 m dpl (Anonymous, 2007b). Mata air yang muncul di Desa Tulungrejo, Ds. Jombok, Ds. Waturejo dan Ds. Sumberagung berada pada satuan geologi G. Anjasmoro tua. Mata air yang berada di Desa Purworejo, Ds. Banjarejo, Ds. Sidodadi dan Ds. Pagersari dipengaruhi geologi G. Kawi-Butak yang berumur lebih muda. Sedangkan mata air yang berada di Desa Baturejo, Ds. Ngantru dan Ds. Pandesari dipengaruhi oleh struktur geologi G. Kelud. Gunung ini merupakan gunung api termuda yang masih aktif pada gugusan ini. Pada umumnya mata air di Ngantang muncul di kaki bukit, air keluar dari rekahan dan batu-batuan, seperti mata air Ngesong, Dompok dan Kali Babi.



Permeabilitas (konduktivitas hidroulik) akuifer dipengaruhi oleh jenis material batuan penyusunnya (Todd *and* Mays, 2005). Hasil survei tanah di Ngantang (Anonymous, 1984) menyebutkan bahan endapan/sedimen vulkanik tebal yang menutupi DAS Konto berperan sebagai akuifer utama. Abu vulkanik dengan tekstur berlempung dan tanah yang terbentuk dari bahan ini bersifat sangat berongga, mempunyai permeabilitas tinggi dan merupakan penahan air sangat baik. Batuan andesitik yang rapuh dan melapuk maupun hasil sortasi batuan *pumice* (batu apung) kasar juga merupakan media penahan air. Di lain pihak batuan breksi dan konglomerat vulkanik yang kompak dan agak pejal kurang baik sebagai penahan air dan bahkan tuf vulkanik (abu yang tersemen dan mantap) merupakan penahan air yang jelek meskipun porositas cukup tinggi. Sedangkan agak ke bawah bagian lereng, bahan permeabel tersebut diselingi dengan lapisan yang kurang permeabel, sehingga muncul mata air. Sebagian besar mata air di Ngantang dijumpai pada lapisan batuan breksi dan konglomerat (bahan lahar yang tersemen dan tertimbun). Selain itu mata air juga terjadi di bawah singkapan batu apung yang tersusun baik di atas tuf yang kurang permeabel atau abu yang kompak.

Besarnya debit, sifat aliran air dan temperatur mata air dapat digunakan untuk menentukan karakteristik mata air (Santosa, 2006). Murdiono (1972) menyatakan pada satuan pegunungan lipatan dijumpai mata air berdebit kecil, berkisar antara 0,4 hingga 5 l.detik⁻¹. Sedangkan pada satuan gunung api muda, mata air mempunyai kisaran debit cukup bervariasi, yaitu kurang dari 10 l.detik⁻¹ hingga lebih dari 50 l.detik⁻¹. Hasil identifikasi awal 14 mata air berdebit kecil (< 5 l.detik⁻¹) di Kec. Ngantang umumnya menunjukkan penurunan debit di musim kemarau. Terdapat 11 mata air mengalami penurunan debit, tetapi masih mengalir terus sepanjang tahun seperti mata air Krisik, Kalimantan, Jeruk kuwik, Ngesong, Gempol, Ringin, Gondo, Dompjong, Kali Babi dan Bendo. Sedangkan tiga mata air lainnya tidak menghasilkan debit di musim kemarau, seperti mata air Complang, Kali Embong dan Pusung Pegat (Yulistyarini *et al.*, 2009). Tujuan penelitian ini adalah melakukan identifikasi dan karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat berdasarkan morfologi, struktur batuan penyusunnya dan debitnya.



4.2. METODE PENELITIAN

1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di tiga mata air, yaitu mata air Krisik (Ds. Jombok), Complang (Ds. Watujejo) dan Pusung Pegat (Ds. Sumberagung) pada bulan Juli 2009 hingga Juli 2010. Telah dilakukan studi pendahuluan untuk melakukan karakterisasi ketiga mata air dengan hasil terdapat pada Tabel 7. Karakterisasi mata air dilakukan dengan studi literatur, pengamatan altitude dan debit mata air dan penggalian informasi dari masyarakat di sekitar tiga mata air tersebut.

Tabel 7. Karakteristik mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat di Kecamatan Ngantang

No	Nama mata air	Debit (l.detik ⁻¹)			Altitude (m dpl)	Materi batuan
		Anonimous (2007)	Juli 2009	Fluktuasi debit		
1	Krisik	2,0 – 4,0	1,03	Ya, tidak mengering	650	Qpat
2	Complang	2,5 – 7,0	0,64	Ya, mengering	668	Qpat
3	Pusung Pegat	2,6 – 7,0	0,2	Ya, mengering	677	Qpat

Keterangan: Qpat : Batuan Gunung api Anjasmara Tua

2. Bahan dan Metode

Identifikasi dan karakterisasi dilakukan dengan pendekatan hidrogeomorfologi (Santosa, 2006). Data morfologi mata air terdiri dari posisi geografis, kelerengan dan ketinggian tempat. Data geofisik berupa struktur batuan penyusun mata air dan karakteristik akuifer, sedangkan data hidrologi mata air terdiri dari debit dan curah hujan.

Posisi geografis tiap mata air diukur dengan menggunakan GPS (*Global positioning system*): Data kelerengan diinterpretasi dari peta topografi Kec. Ngantang skala 1:25.000. Dari peta topografi diperoleh informasi kontur guna interpersasi ketinggian tempat dan lereng, sehingga dapat dihasilkan peta tematik relief dan peta lereng Kecamatan Ngantang.

Data geofisik yang menggambarkan struktur batuan penyusun mata air diperoleh dengan metode geolistrik resistivitas konfigurasi *Schlumberger* (Todd and Mays, 2005; Zubaidah dan Bulkis, 2008). Metode geolistrik resistivitas (hambatan jenis) akan menduga kondisi bawah permukaan bumi dengan memanfaatkan arus listrik yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda

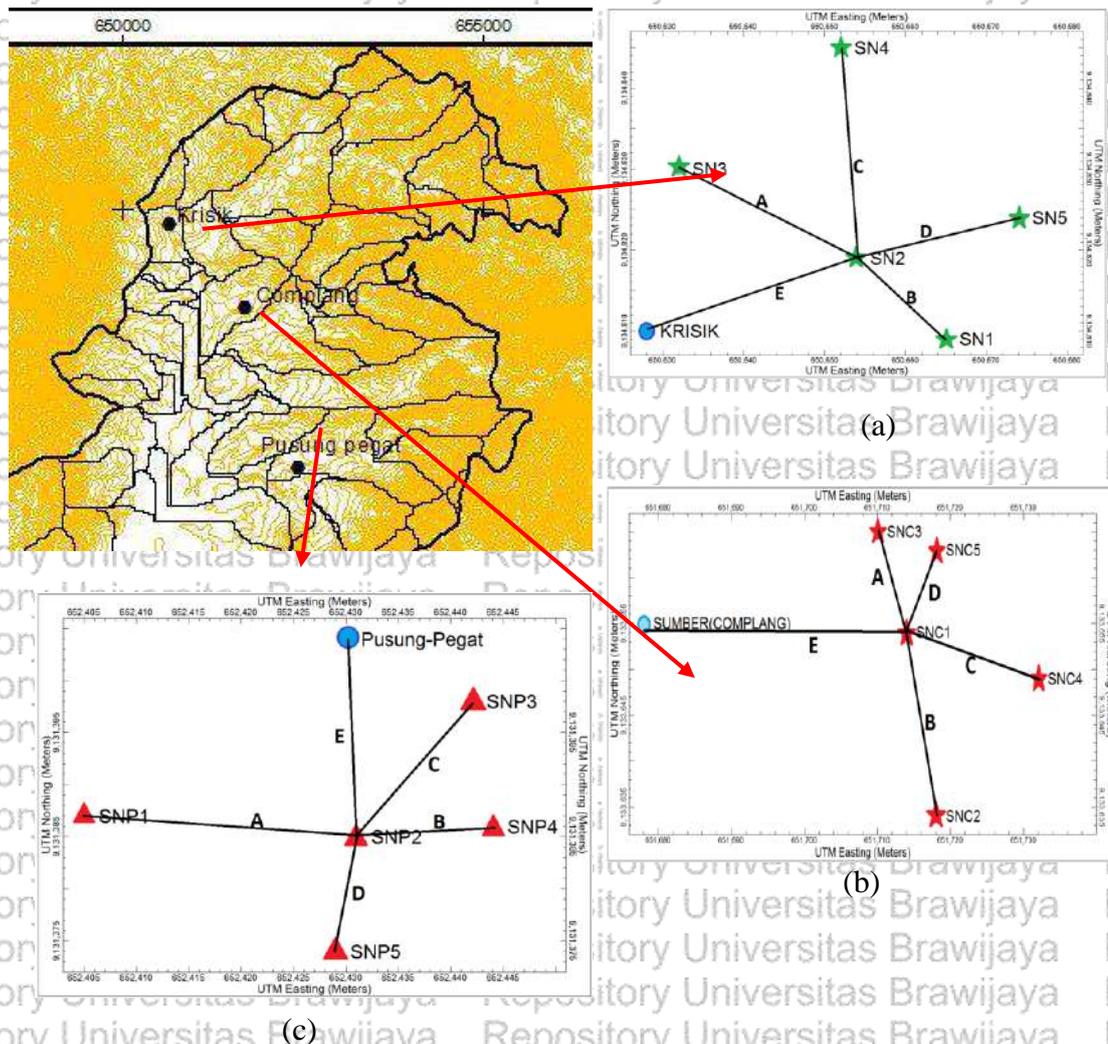


arus, kemudian beda potensial yang dihasilkan diukur dengan menggunakan dua elektroda potensial. Hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda tertentu digunakan untuk menentukan variasi harga hambatan jenis masing-masing lapisan di bawah titik ukur (titik *sounding*). Pengambilan data di lapangan dibantu dengan alat *Resistivity M OYYO TIPE MCOHM-ELMODEL-2119D*.

Proses pengambilan data meliputi beberapa tahap pelaksanaan, yaitu:

- 1) Penentuan titik *sounding*, diupayakan berada di atas mata air dan diperkirakan merupakan daerah resapan mata air. Pada penelitian ini ditentukan lima titik *sounding* terdiri dari berbagai arah (Gambar 16).
- 2) Pengambilan data dilakukan dengan mengubah-ubah jarak elektroda arus (AB) maupun elektroda potensial (MN) secara bertahap. Jarak elektroda bertambah seiring dengan kedalaman yang ingin dicapai. Semakin besar jarak elektroda maka akan semakin dalam jangkauan yang dihasilkan. Bentangan elektroda arus (AB/2) yang digunakan dalam penelitian ini adalah 70 m dengan jarak elektroda potensial (MN) berubah sampai 8 m. Data yang diperoleh adalah nilai arus (I), hambatan yang terukur (R), jarak elektroda arus dan jarak elektroda potensial.
- 3) Proses pengolahan data dilakukan dengan bantuan *software IP2WIN* dan *Progress*. Dengan memasukkan data berupa nilai arus, jarak elektroda dan nilai resistivitas hasil pengukuran, maka dapat diketahui struktur lapisan bawah permukaan tanah. Data yang dihasilkan dari kedua *software* tersebut meliputi nilai resistivitas batuan, kedalaman, ketebalan dan tingkat kesalahannya.
- 4) Interpretasi data dilakukan dengan pembuatan model 1 dimensi (1D), dengan terlebih dulu menginterpretasi jenis lapisan berdasarkan nilai resistivitas batuan mengacu pada tabel kisaran nilai resistivitas menurut Verhoef, data sekunder hasil survey tanah di kawasan Ngantang (Anonimous, 1984) dan peta geologi lembar Kediri skala 1:100.000 dan peta hidrogeologi lembar Kediri 1: 250.000. Oleh karena karakterisasi mata air ditujukan pada akuifer dangkal, maka interpretasi data untuk struktur lapisan bawah permukaan tanah dibatasi hingga kedalaman 25 m dari permukaan tanah. Setelah

interpretasi 1D, maka dilakukan interpretasi 2 dimensi (2D) dengan menggunakan *software Rockwork*. Pembuatan Model 2D membutuhkan minimal 2 titik *sounding* yang dihubungkan. Hasil analisis geolistrik digunakan untuk menentukan jenis mata air berdasarkan struktur batuan penyusun dan karakteristik akuifernya.



Gambar 16. Lima titik sounding pengambilan data geolistrik pada mata air (a) Krisik (SN1, SN2, SN3, SN4, SN5), (b) Complang (SNC1, SNC2, SNC3, SNC4, SNC5) dan (c) Pusung Pegat (SNP1, SNP2, SNP3, SNP4, SNP5) dan titik sounding yang telah dihubungkan untuk interpretasi 2D struktur bawah permukaan tiga mata air

Data hidrologi mata air diperoleh dari pengukuran debit di lapangan dan didukung oleh data sekunder. Debit diukur dengan menggunakan gelas ukur 2 liter dan stopwatch (Malvicini *et al.*, 2005; Sada *and* Pohlmann, 2006).



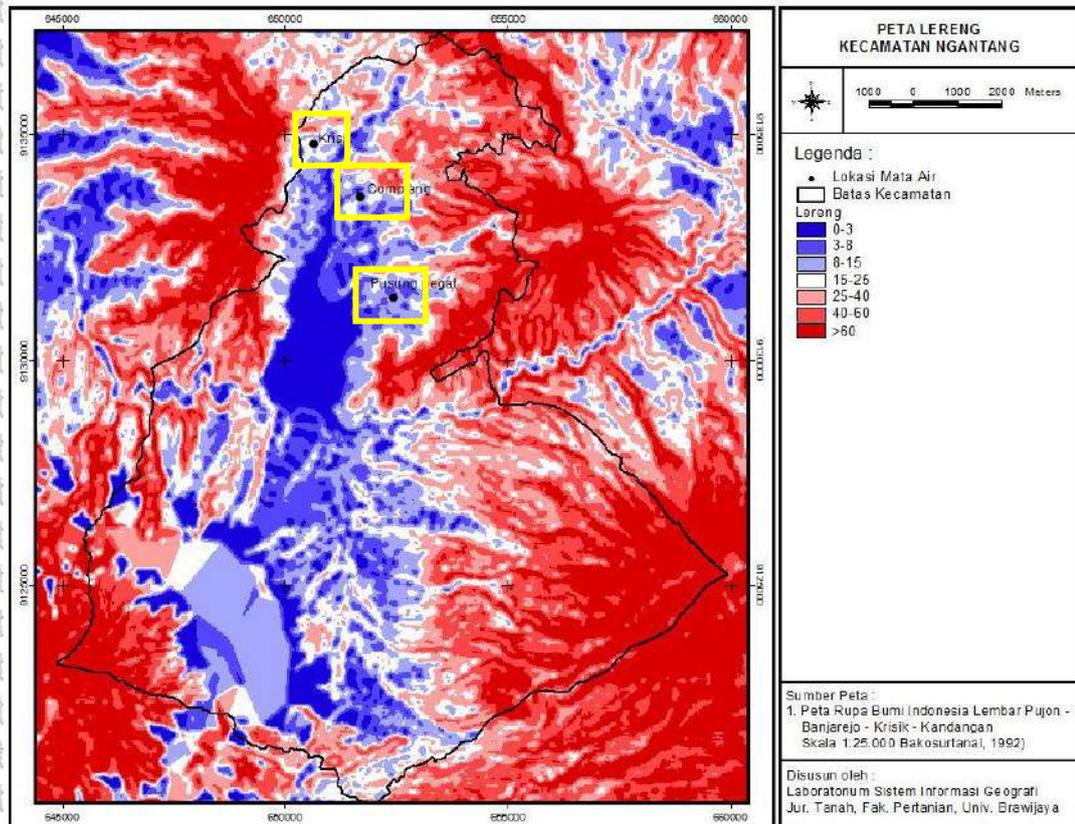
Stopwatch digunakan untuk mencatat waktu yang digunakan air untuk mengisi gelas ukur tersebut (detik). Pencatatan dilakukan sebanyak 10 kali. Pengukuran debit dilakukan tiap 2 minggu selama 1 tahun, mulai bulan Juli 2009 hingga Juli 2010. Data curah hujan merupakan data sekunder, dimana mata air Krisik menggunakan hasil pengukuran curah hujan di Stasiun Jombok. Sedangkan mata air Complang dan Pusung Pegat menggunakan data curah hujan dari Stasiun Ngantang. Data curah hujan bulanan selama penelitian di Stasiun Jombok dan Ngantang diuji secara statistik dengan uji-t ($p < 0,005$) untuk mengetahui adanya perbedaan jumlah curah hujan di kedua stasiun tersebut. Karakteristik hidrologi mata air ditentukan dengan melakukan analisis regresi hubungan antara curah hujan dan debit mata air. Hasil analisis ini juga dapat menggambarkan pola debit masing-masing mata air (Negi and Joshi, 2004).

4.3. HASIL DAN PEMBAHASAN

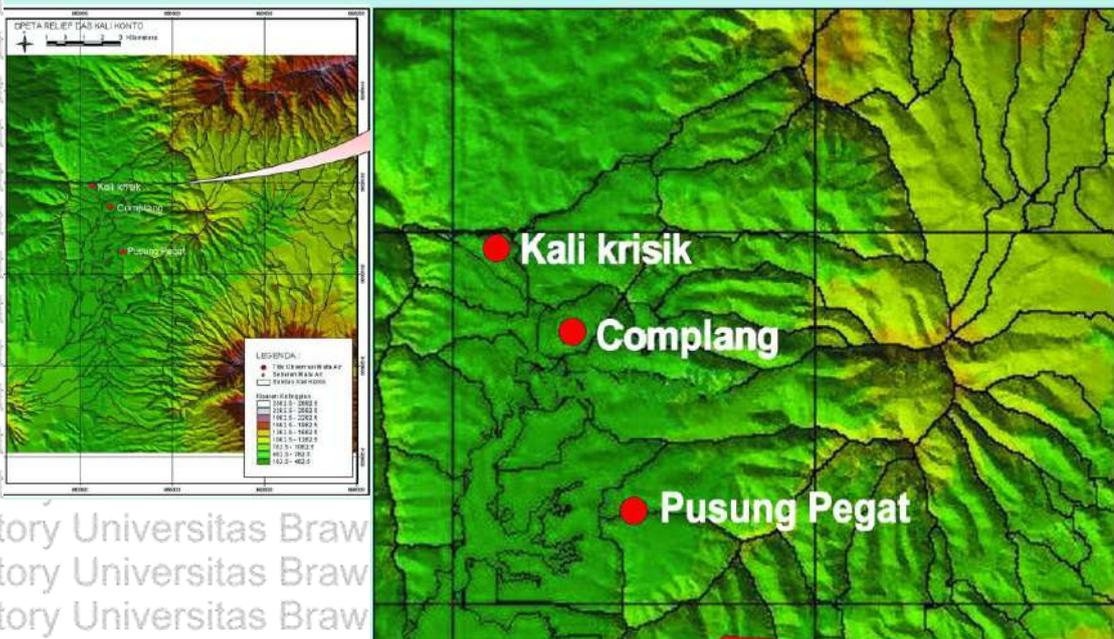
4.3.1. Karakteristik morfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat.

Berdasarkan peta kelerengan diketahui mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat muncul pada daerah dengan kemiringan lereng 8-15%, sehingga dikategorikan ke dalam Satuan Morfologi Kaki Gunung Api (*volcanic foot*) (Gambar 17). Kaki gunung api merupakan daerah berpotensi sebagai tempat munculnya mata air, karena morfologi ini tepat di bawah daerah hujan yang umumnya jatuh pada morfologi kerucut gunung api. Selain itu, pada morfologi ini sering berlangsung proses pengangkutan, erosi dan mulai terjadi pengendapan. Proses ini mendukung terbentuknya struktur batuan yang berlapis, sehingga dapat menimbulkan mata air (Santosa, 2006).

Pemunculan mata air pada daerah yang mempunyai perubahan lereng tajam terjadi akibat permukaan topografi memotong muka air tanah (tekuk lereng). Munculnya ketiga mata air ini pada perubahan kemiringan lereng mengindikasikan adanya perubahan tingkat kelulusan batuan (Purbohadiwidjyo, 1967 dalam Santoso, 2006). Geomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat dapat dilihat pada Gambar 18. Ketiga mata air muncul pada tempat dengan ketinggian $462,5 - 762,5$ m dpl.



Gambar 17. Peta Kelerengn Kecamatan Ngantang



Gambar 18. Peta relief DAS Konto dan geomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat



4.3.2. Karakteristik mata air berdasarkan struktur lapisan bawah permukaan

Berdasarkan nilai resistivitas batuan yang diperoleh, dilakukan interpretasi terhadap struktur lapisan bawah permukaan masing-masing titik *sounding*, sehingga diketahui jenis batuan (litologi) dan karakteristik akuifernya. Hasil interpretasi 1Dimensi (1D) terhadap struktur lapisan bawah permukaan tanah tiap mata air hingga kedalaman 25 m di bawah permukaan tanah menunjukkan lapisan bawah permukaan tanah pada mata air Krisik, Complang dan Ngantang memiliki struktur batuan yang hampir sama. Umumnya lapisan pertama diidentifikasi sebagai tanah (*top soil*), lapisan ke dua berupa batu pasir yang tidak terkonsolidasi, lapisan ke tiga berupa batuan beku atau tufa. Lapisan yang memiliki nilai resistivitas antara 10-100 Ω m diinterpretasikan sebagai batu pasir tidak terkonsolidasi, yang mengandung air dan disebut dengan akuifer. Lapisan yang mempunyai nilai resistivitas kurang dari 10 Ω m diinterpretasikan sebagai tufa. Sedangkan lapisan yang mempunyai nilai resistivitas lebih dari 200 Ω m diinterpretasikan sebagai batuan beku.

4.3.2.1. Interpretasi model 1 Dimensi (1D) dan 2 Dimensi (2D) lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik

Hasil interpretasi model 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik pada 5 titik *sounding* menunjukkan perkiraan akuifer yang terletak langsung di bawah lapisan tanah adalah titik SN2 (Tabel 8). Akuifer tersebut terletak pada kedalaman 0,93 m dpt dengan ketebalan sebesar 12,59 m. Sedangkan pada titik *sounding* SN1, SN3, SN4 dan SN5, akuifer mata air berada di bawah batuan beku. Adanya batuan beku pada titik hanya berupa sisipan karena tidak menutupi seluruh akuifer, sehingga akuifer masih bisa dikategorikan sebagai akuifer bebas dan dangkal.

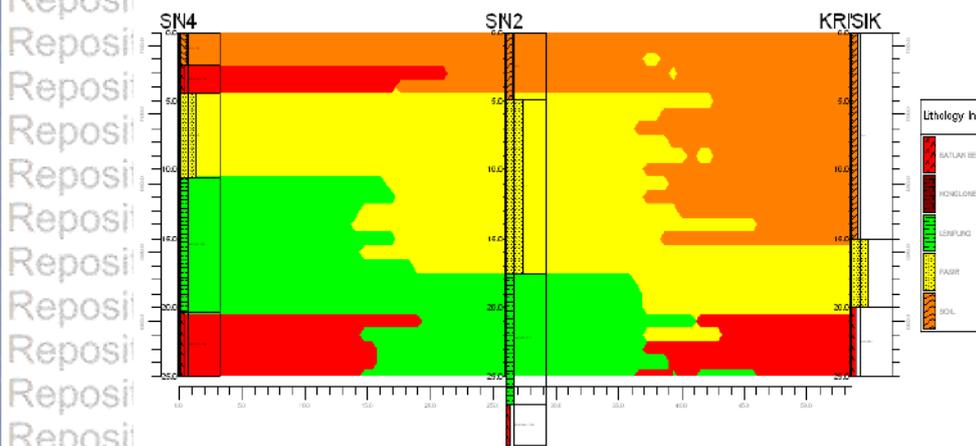
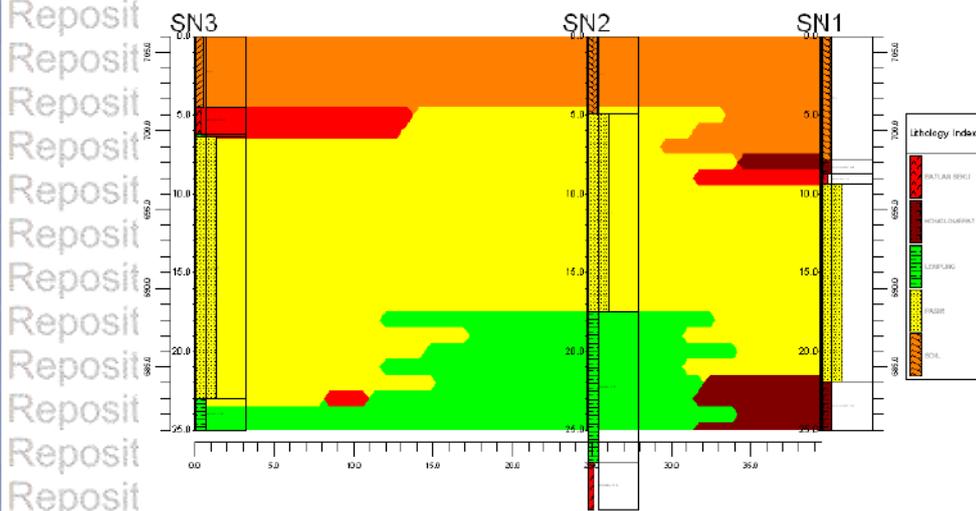
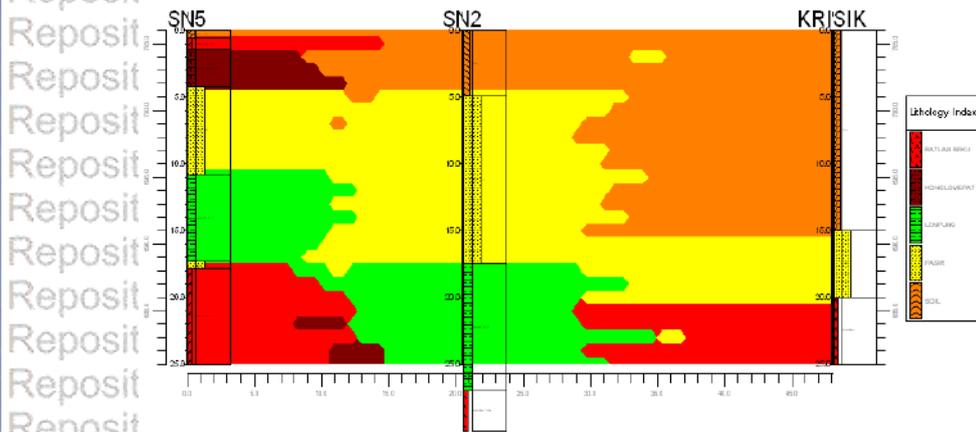
Untuk memperjelas hasil interpretasi 1D dibuat model 2D berdasarkan perbedaan ketinggian titik *sounding*. Hasil model 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik terlihat pada Gambar 19. Perbedaan nilai resistivitas batuan ditunjukkan dengan adanya perbedaan warna. Terdapat tiga model 2D yang menggambarkan kondisi lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik, yaitu titik SN5-SN2-mata air, SN3-SN2-SN1 dan SN4-SN3-mata air. Pada Gambar



19a terlihat bahwa akuifer bagian atas pada titik SN2, jika dihubungkan dengan SN5, terdapat sisipan batuan beku setebal 0,86 m dan konglomerat setebal 2,73 m. Pada Gambar 19b terlihat akuifer bagian atas sebagian disisipi oleh batuan beku setebal 16,96 m, jika titik SN2 dihubungkan dengan SN3. Jika titik SN2 dihubungkan dengan SN1 maka sebagian akuifer bagian atas tertutupi oleh konglomerat, serta batuan beku yang tipis kurang dari 1 m. Pada Gambar 19c terlihat bahwa antara lapisan tanah dan akuifer mata air, terdapat sisipan batuan beku dengan tebal hingga 2,08 m, jika SN2 dihubungkan dengan titik SN4. Dari gambar tersebut diketahui akuifer bagian bawah dibatasi oleh lapisan tufa dan batuan beku.

Tabel 8. Hasil interpretasi 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik

Titik Sounding	Kedalaman (m)	Ketebalan (m)	Resistivitas (Ω m)	Pendugaan Litologi	Hidrogeologi
SN1	0 - 0,88	0,88	427	Tanah	
	0,88 - 1,74	0,86	136	Konglomerat	
	1,74 - 2,38	0,64	542	Batuan beku	
	2,38 - 14,9	12,52	12,3 - 99,2	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	14,9 - 25	10,1	157	Konglomerat	
	SN2	0 - 0,93	0,93	243	Tanah
	0,93 - 13,52	12,59	17,61 - 84,31	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	13,52 - 23,38	9,86	6,99-7,01	Tufa	
	23,38 - 25	46,62	450,5	Batuan beku	
SN3	0 - 0,49	0,49	129,9	Tanah	
	0,49 - 2,19	1,7	445,1	Batuan beku	
	2,19 - 2,38	0,19	4,27	Tufa	
	2,38 - 19	16,62	26,9 - 69,56	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	19 - 25	6	4,41	Tufa	
	SN4	0 - 1,37	1,37	256	Tanah
	1,37 - 3,45	2,08	253	Batuan beku	
	3,45 - 9,55	6,10	36,9 - 98,9	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	9,55 - 19,3	9,75	8,16	Tufa	
SN5	19,3 - 25	5,7	10,3	Batuan beku	
	0 - 0,583	0,58	149	Tanah	
	0,583 - 1,47	0,89	256	Batuan beku	
	1,47 - 4,2	2,73	128	Konglomerat	
	4,2 - 10,8	6,60	42,9 - 64,6	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	10,8 - 17,3	6,50	5,59	Tufa	
	17,3 - 17,9	0,60	26	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	17,9 - 25	7,1	1131	Batuan beku	



Keterangan :

- Pendugaan Litologi
- Tufa
 - Tanah
 - Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi
 - Batuan beku
 - Konglomerat

Gambar 19. Hasil interpretasi model 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik, hingga kedalaman 25 m

Keterangan :

- a. Model 2D titik SN5-SN2-mata air
- b. Model 2D titik SN3- SN2 – SN1
- c. Model 2D titik SN 4 – SN2 – mata air



4.3.2.2. Interpretasi model 1D dan 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang

Hasil interpretasi model 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang pada 5 titik sounding, diketahui akuifer terletak langsung di bawah lapisan tanah pada semua titik sounding (Tabel 9). Akuifer mata air Complang diperkirakan terletak pada kedalaman 1,04 - 1,71 m di bawah permukaan tanah dan ketebalannya mencapai 1,08 - 5,22 m.

Terdapat tiga model 2D yang menggambarkan kondisi lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang, yaitu Gambar 20a titik SNC5-SNC1-mata air, Gambar 20b titik SNC4-SNC1-mata air dan Gambar 20c titik SNC3-SNC1-SNC2. Dari ketiga model tersebut terlihat akuifer berada langsung di bawah lapisan tanah, sehingga akuifer mata air ini merupakan akuifer bebas dan dangkal. Pada Gambar 20a dan 20b terlihat adanya sisipan konglomerat di antara akuifer. Bagian bawah akuifer dibatasi oleh lapisan kedap air, yaitu tufa. Sedangkan Gambar 20c menunjukkan struktur lapisan bawah permukaan yang berlapis-lapis, akuifer disisipi oleh konglomerat dan tufa. Dengan demikian, diperkirakan akuifer mata air Complang berada pada titik SNC5- SNC1-mata air dan SNC2-SNC1-mata air.

4.3.2.3. Interpretasi model 1D dan 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Pusung Pegat

Hasil interpretasi model 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Pusung Pegat pada 5 titik sounding, diketahui akuifer terletak langsung di bawah lapisan tanah pada titik sounding SNP2, SNP3 dan SNP5 (Tabel 10). Akuifer mata air Pusung Pegat diperkirakan terletak pada kedalaman 1,18 - 1,49 m di bawah permukaan tanah dan ketebalannya mencapai 0,9 - 2,94 m.

Terdapat tiga model 2D yang menggambarkan kondisi lapisan bawah permukaan tanah mata air Pusung Pegat, yaitu titik SNP5 – SNP2 – mata air (Gambar 21a), SNP3-SNP2-SNP1 (Gambar 21b) dan SNP4-SNP2-mata air (Gambar 21c). Dari ketiga model tersebut terlihat akuifer berada langsung di bawah lapisan tanah, akan tetapi terlihat adanya sisipan konglomerat, tufa dan



batuan beku di antara akuifer. Bagian bawah akuifer dibatasi oleh lapisan kedap air, yaitu tufa dan batuan beku.

Tabel 9. Hasil interpretasi 1D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang

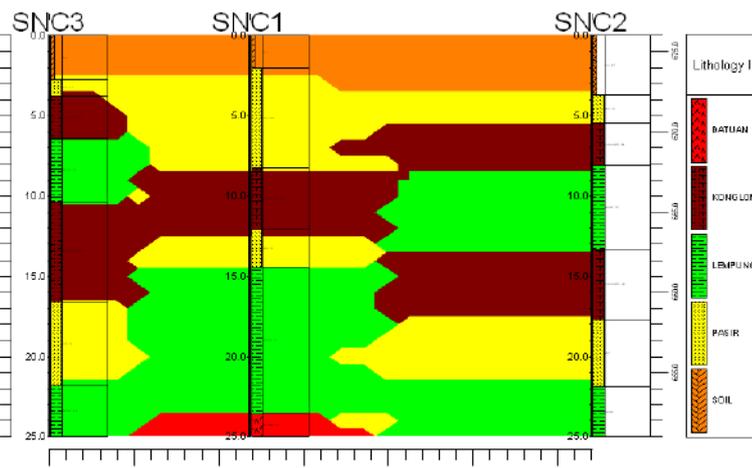
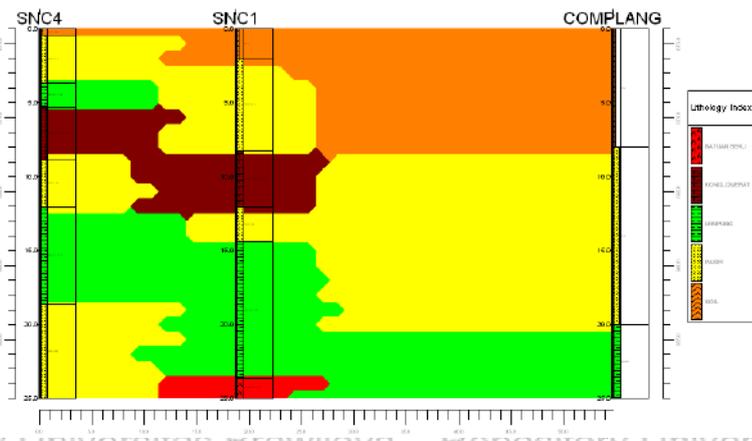
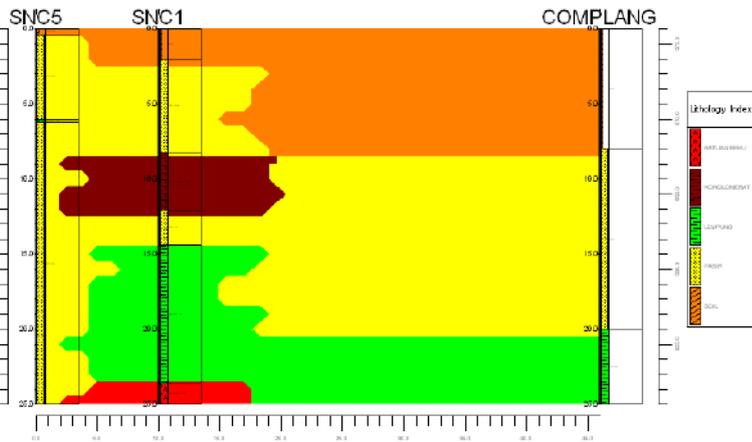
Titik	Kedalaman (m)	Ketebalan (m)	Resistivitas (Ω m)	Pendugaan	
				Litologi	Hidrogeologi
SNC1	0 - 1,04	1,04	0,4	Tanah	
	1,04 - 6,26	5,22	14,8-59,1	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	6,26 - 10,1	3,84	167	Konglomerat	
	10,1 - 12,4	2,3	69,8	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	12,4 - 21,6	9,2	2,91-3,08	Tufa	
SNC2	21,6 - 25	3,4	222	Batuan beku	
	0 - 1,69	1,69	63,2	Tanah	
	1,69 - 3,44	1,75	25,5	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	3,44 - 6,1	2,66	108-162	Konglomerat	
	6,1 - 11,3	5,2	4,16	Tufa	
SNC3	11,3 - 15,7	4,4	124	Konglomerat	
	15,7 - 19,9	4,2	99,9	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	19,9 - 25	5,1	0,3	Tufa	
	0 - 1,71	1,71	44,3	Tanah	
	1,71 - 2,79	1,08	10,7	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
SNC4	2,79 - 5,38	2,59	135	Konglomerat	
	5,38 - 9,33	3,95	2,11	Tufa	
	9,33 - 15,6	6,27	152	Konglomerat	
	15,6 - 20,8	5,2	76,2	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	20,8 - 25	5,8	5,55	Tufa	
SNC5	0 - 1,47	1,47	136,6	Tanah	
	1,47 - 3,7	2,27	37,1	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	3,74 - 5,34	1,60	6,79	Tufa	
	5,34 - 8,93	3,59	111,8	Konglomerat	
	8,93 - 12,05	3,12	34,4	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
SNC5	12,05 - 18,61	6,56	3,18	Tufa	
	18,61 - 25	6,39	82,97	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	0 - 1,38	1,38	444	Tanah	
SNC5	1,38 - 6	4,62	44,1	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	6 - 6,22	0,22	2,17	Tufa	
	6,22 - 25	21,58	11,6 - 94	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer



Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya



Keterangan:
 Pendugaan Litologi

- Tufa
- Tanah
- Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi
- Batu beku
- Konglomerat

Gambar 20. Hasil interpretasi 2D lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang

- Keterangan: a. Model 2D titik SNC5-SNC1-mata air
- b. Model 2D titik SNC4- SNC1 – mata air
- c. Model 2D titik SNC3 – SNC1 – SNC2



Tabel 10. Hasil interpretasi satu dimensi (1D) lapisan bawah permukaan tanah hingga kedalaman 25 m di mata air Pusung Pegat

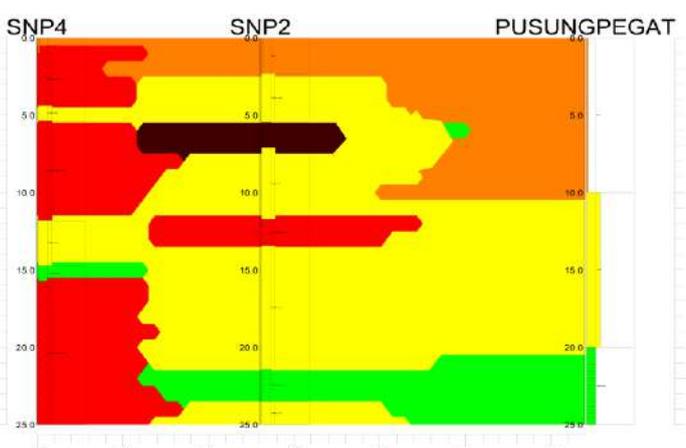
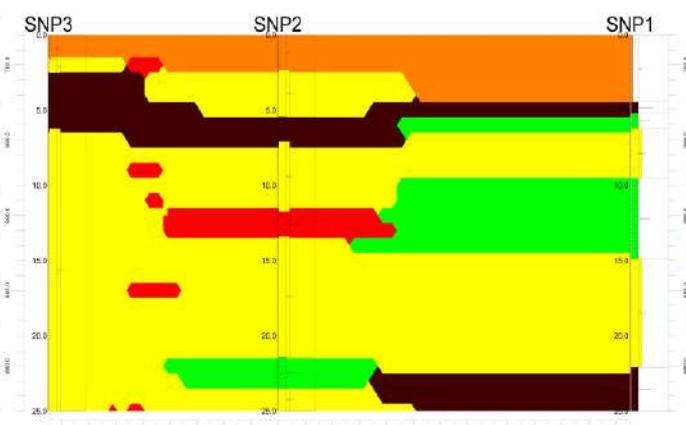
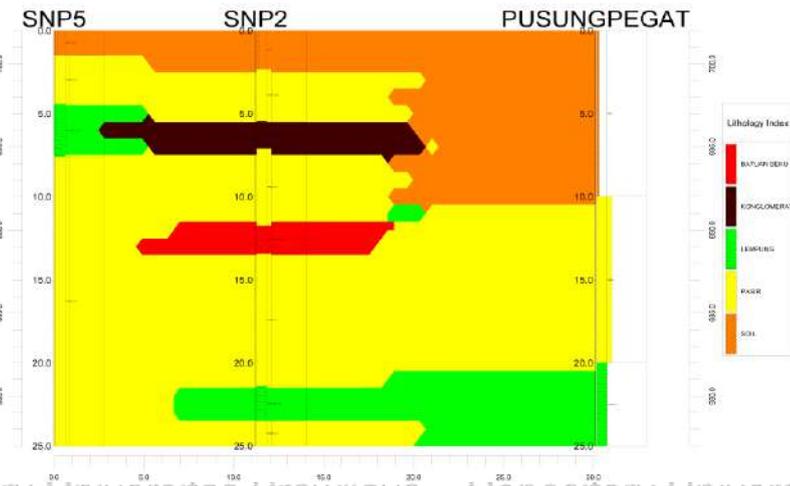
Titik	Kedalaman (m)	Ketebalan (m)	Resistivitas (Ω m)	Pendugaan	
				Litologi	Hidrogeologi
SNP1	0 - 0,48	0,48	35,8	Tanah	
	0,48 - 1,23	0,75	192	Konglomerat	
	1,23-2,24	1,01	5,03	Tufa	
	2,24 - 5,54	3,3	74,9	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	5,54-10,9	5,36	4,12	Tufa	
	10,9 - 15,1	4,2	10 - 12,5	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
SNP2	15,1-18,1	3	330	Batuan beku	
	18,1 - 25	6,9	150	Konglomerat	
	0 - 0,32	1,32	317	Tanah	
	1,32 - 3,35	2,03	32,6 - 95,7	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	3,35 - 5,09	1,74	122	Konglomerat	
	5,09 - 9,74	4,65	11	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
SNP3	9,74 - 11,4	1,66	520	Batuan beku	
	11,4 - 19,4	8	57,4	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	19,4 - 21,5	2,1	0,58	Tufa	
	21,5 - 25	3,5	12,8	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	0 - 1,18	1,18	227	Tanah	
	1,18 - 2,1	0,92	22,4	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
SNP4	2,1 - 5,24	3,14	102-117	Konglomerat	
	5,24 - 25	19,76	17,5 - 73,4	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	0 - 0,95	0,95	1251	Tanah	
	0,95 - 4,37	3,42	512	Batuan beku	
	4,37 - 5,36	0,99	63,3	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	5,36 - 11,8	6,44	999	Batuan beku	
SNP5	11,8 - 14,7	2,9	18,6	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	14,7 - 15,7	1	0,27	Tufa	
	15,7 - 25	21,1	1593	Batuan beku	
	0 - 1,49	1,49	75,3	Tanah	
	1,49 - 4,43	2,94	13,15 - 67,31	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer
	4,43 - 7,59	3,16	6,04	Tufa	
7,59 - 25	17,41	26,35-62,41	Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi	Akuifer	



Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya
 Repository Universitas Brawijaya



Keterangan :
 Pendugaan Litologi
 Tufa
 Tanah Batu Pasir yang tidak terkonsolidasi
 Batuan beku
 Konglomerat

Gambar 21. Hasil interpretasi 2D lapisan bawah permukaan tanah hingga kedalaman 25 m di mata air Pusung Pegat
 Keterangan: a. Model 2D titik SNP5 – SNP2 – mata air
 b. Model 2D titik SNP3 – SNP2 – SNP1
 c. Model 2D titik SNP4 – SNP2 – mata air

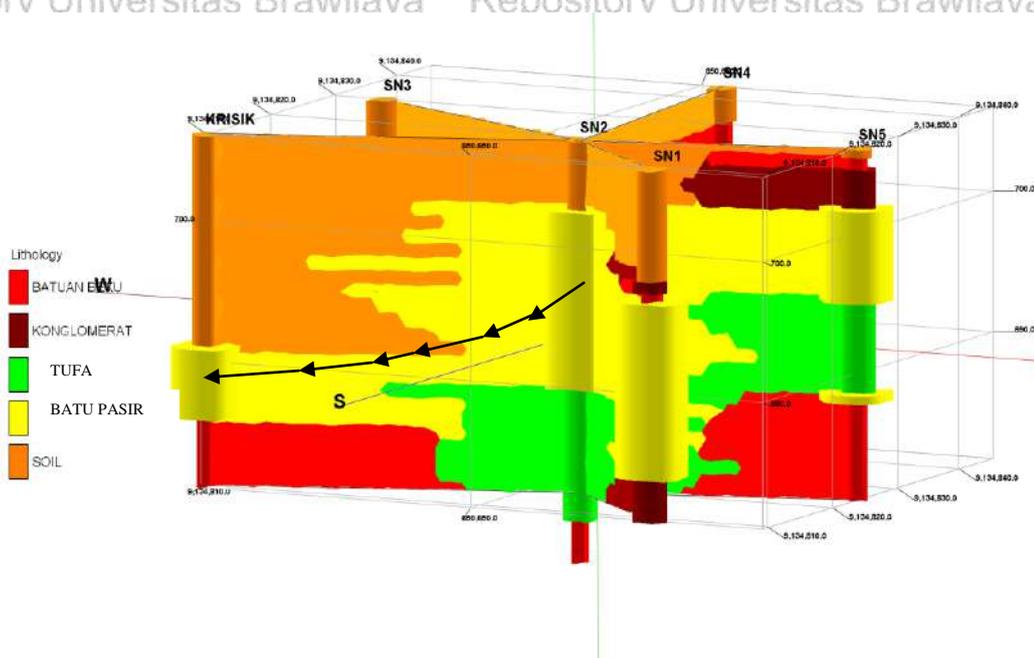


Hasil interpretasi model 2 D struktur lapisan bawah permukaan menunjukkan lapisan bawah permukaan tanah ketiga mata air terdiri dari lapisan-lapisan batuan yang terbentuk akibat aktivitas vulkanik. Struktur batuan tersebut terdiri dari batu pasir yang tidak terkonsolidasi, konglomerat, batuan beku atau tufa. Batu pasir memiliki porositas besar karena memiliki butir batuan yang membulat dengan permeabilitasnya besar, sehingga mampu menyimpan air dan mengalirkannya dalam jumlah yang berarti. Dengan demikian batu pasir yang tidak terkonsolidasi merupakan akuifer di daerah ini. Sedangkan tufa, batuan beku dan konglomerat diperkirakan merupakan lapisan impermeabel, sehingga lapisan ini berfungsi untuk menahan air tanah agar tidak turun ke lapisan bawahnya dan air mengalir horizontal. Tufa dan batuan beku memiliki porositas besar karena memiliki ukuran butir yang seragam yaitu kecil dan halus, namun memiliki permeabilitas rendah sehingga tidak mampu untuk menyimpan dan mengalirkan air. Adanya perlapisan antara batuan yang bersifat porous (batu pasir) dengan batuan yang bersifat kedap air, seperti batuan beku atau tufa yang relatif kompak menyebabkan mengalirnya air tanah tidak bisa meresap ke lapisan di bawahnya, tetapi air keluar ke permukaan sebagai mata air kontak (Todd and Mays, 2005). Jenis batuan beku yang mendasari akuifer di Ngantang adalah breksi dan konglomerat (Anonimous, 1984). Dengan demikian, berdasarkan struktur lapisan batuan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat dikategorikan sebagai mata air kontak. Hal ini didukung dengan keterangan dalam Peta Geologi Lembar Kediri disebutkan terdapat pengaruh kontak batuan pada formasi batuan Qpat (batuan Anjasmara tua) di Ngantang.

Adanya sisipan batuan konglomerat, batuan beku dan tufa pada struktur lapisan bawah mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menyebabkan aliran air yang masuk ke dalam mata air merupakan aliran lokal. Resapan air pada mata air kontak bersifat lokal dan berasal dari infiltrasi air hujan. Aliran lokal ketiga mata air ini berasal dari daerah resapan relatif lebih kecil dan dekat dengan mata air. Umumnya mata air beraliran lokal mempunyai variasi debit, tergantung musim dan debitnya kurang dari 28 l.detik^{-1} . Pergerakan air pada aliran ini berada pada akuifer bebas dan dangkal, sehingga dipengaruhi oleh kondisi lahan di atasnya (Sada and Pohlmann, 2006).



Adanya aliran lokal pada akuifer ketiga mata air diperkuat dengan hasil analisis pola aliran air dari akuifer menuju mata air dengan menggunakan model 3D lapisan bawah permukaan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat, seperti terlihat pada Gambar 22, 23 dan 24. Pada mata air Krisik, air mengalir dari titik SN2 menuju ke arah barat dan keluar ke mata air (Gambar 22).

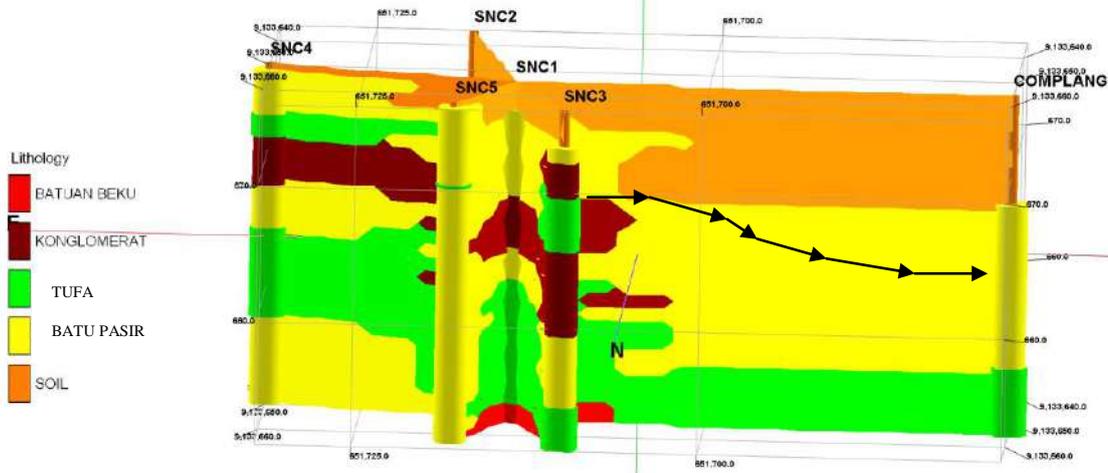


Gambar 22. Lapisan bawah permukaan tanah mata air Krisik dan pola aliran airnya (→)

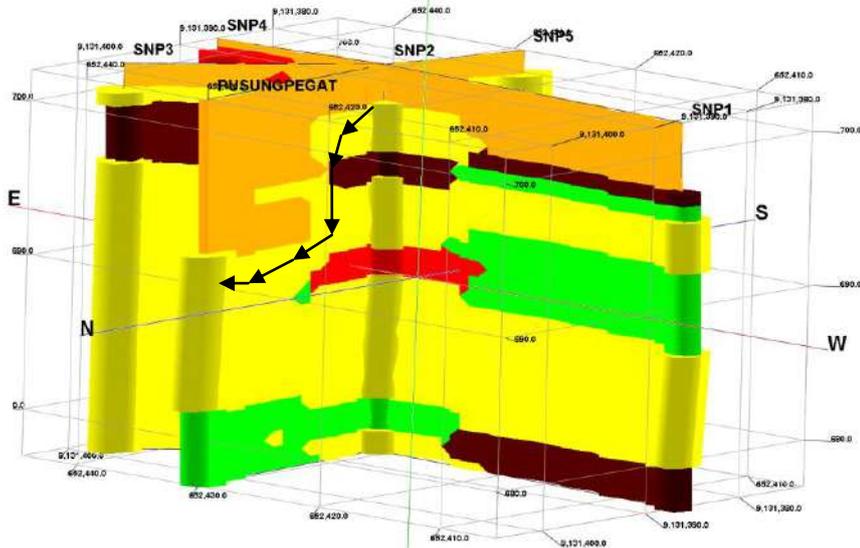
Hasil perkiraan pola aliran air dari akuifer menuju mata air Complang dengan menggunakan model 3D lapisan bawah permukaan mata air menunjukkan arah aliran air dari titik SNC 3 menuju SNC1 kemudian ke mata air (Gambar 23). Sedangkan pola aliran air pada lapisan bawah permukaan mata air Pusung Pegat adalah sebagai berikut air mengalir dari akuifer di titik SNP 5 menuju SNP2 kemudian ke mata air (Gambar 24).



Repository Universitas Brawijaya



Gambar 23. Lapisan bawah permukaan tanah mata air Complang dan pola aliran airnya (→)



Gambar 24. Lapisan bawah permukaan tanah mata air Pusung Pegat dan pola aliran airnya (→)

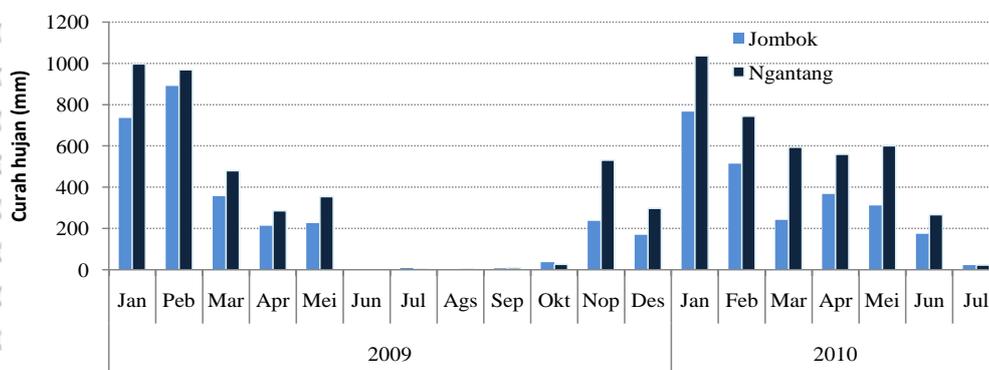


4.3.3. Karakteristik mata air berdasar debit dan hubungan debit dengan curah hujan

Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menghasilkan debit kecil, kurang dari 5 l.detik⁻¹. Berdasarkan besarnya debit yang mengalir menurut Meinzer (1923, dalam Todd *and* Mays, 2005), ketiga mata air ini diklasifikasikan ke dalam kelas VI, yaitu mata air dengan debit 0,1-1 l.detik⁻¹. Kecilnya debit disebabkan akuifer ketiga mata air merupakan akuifer dangkal dan kecil (akuifer tipis). Hal ini bisa dilihat dari hasil analisis geolistrik dengan model 2D, dimana diperkirakan akuifer ketiga mata air berada pada kedalaman 0,93-1,71 m dan ketebalan 0,9 - 12,59 m. Selain itu, kecilnya debit juga bisa disebabkan mata air yang terbentuk dari Formasi Gunung api Anjasmoro tua. Ardina (1985) menyebutkan debit mata air yang berasal dari formasi gunung api tua lebih kecil dibandingkan dengan dengan debit mata air dari formasi gunung api muda. Semakin tua umur batuan gunung api, maka proses pemadatan dan perekatan menjadi lebih intensif. Proses ini menyebabkan rongga antar butir (makro porositas) menjadi lebih kecil, sehingga nilai permeabilitasnya juga kecil. Mata air yang airnya berasal dari akuifer kecil atau sangat permeabel memiliki debit berfluktuasi dan kadang-kadang kering pada musim kemarau (Linsley *and* Franzini, 1979).

Debit mata air tergantung pada curah hujan beberapa bulan sebelumnya. Umumnya data curah hujan di Ngantang lebih tinggi dibandingkan dengan curah hujan di Jombok (Gambar 25). Menurut data curah hujan Stasiun Jombok, daerah resapan mata air Krisik memiliki curah hujan tahunan sebesar 2880 mm dengan curah hujan bulanan berkisar antara 0 dan 891 mm selama tahun 2009. Sedangkan pada periode Januari hingga Juli 2010, daerah ini memiliki curah hujan sebesar 2399 mm dengan curah hujan bulanan berkisar antara 23 dan 767 mm. Jumlah curah hujan tahunan selama periode penelitian pada tahun 2009 tersebut kurang dari rata-rata hujan tahunan Kecamatan Ngantang, yaitu sebesar 3000 mm per tahun. Akan tetapi berdasarkan uji-t ($p < 0,005$), besarnya curah hujan di kedua desa ini tidak menunjukkan perbedaan nyata. Menurut klasifikasi Oldeman, bulan basah (BB) adalah bulan dengan total curah hujan kumulatif lebih dari 200 mm. Sedangkan bulan kering (BK) adalah bulan dengan total curah hujan kumulatif

kurang dari 100 mm (Lakitan, 1994). Pada tahun 2009, Ngantang mengalami bulan basah pada bulan Januari hingga Mei dan Nopember 2009 (6 BB). Sedangkan bulan kering terjadi pada bulan Juni hingga Oktober dan Desember 2009 (6 BK).



Gambar 25. Profil curah hujan di Jombok dan Ngantang Januari 2009 – Juli 2010

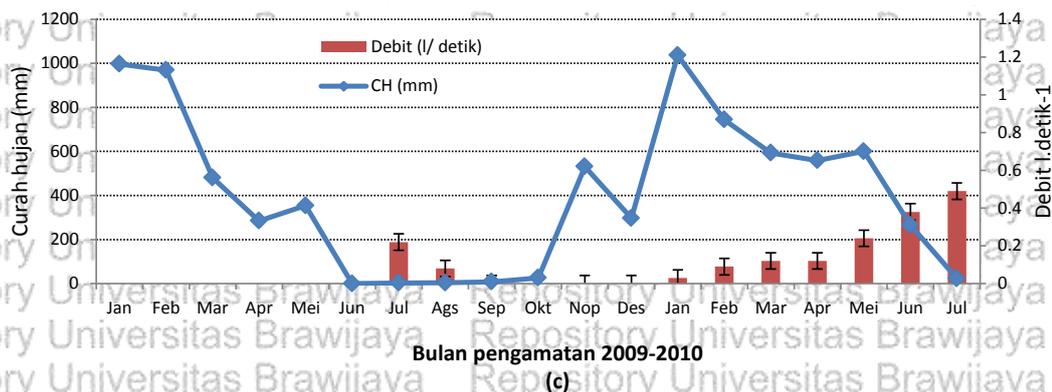
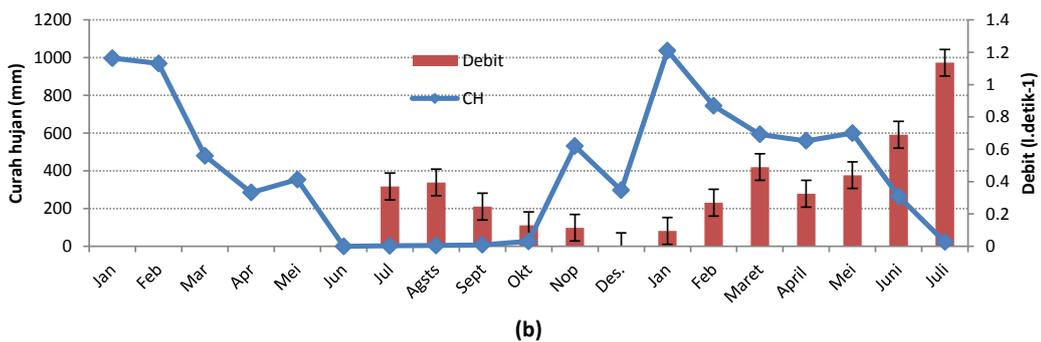
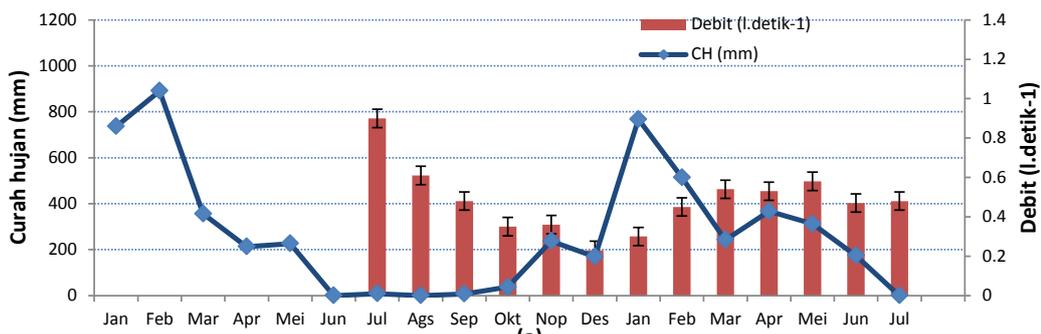
Pengukuran jumlah curah hujan mata air Complang dan Pusung Pegat menggunakan data curah hujan dari Stasiun Ngantang. Mata air Complang dan Pusung Pegat memiliki curah hujan tahunan sebesar 3954 mm, dengan curah hujan bulanan berkisar antara 0 dan 997 mm selama tahun 2009. Jumlah curah hujan ini melebihi rata-rata curah hujan tahunan di Kecamatan Ngantang. Sedangkan pada periode Januari hingga Juli 2010, daerah ini memiliki curah hujan sebesar 3263 mm dengan curah hujan berkisar antara 0 dan 1037 mm. Pada tahun 2009, bulan basah terjadi pada bulan Januari hingga Mei dan Nopember-Desember 2009 (7 BB). Sedangkan bulan kering terjadi pada bulan Juni hingga Oktober 2009 (5 BK).

Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menunjukkan pola hubungan antara curah hujan dan debit mata air yang hampir sama, debit mata air mengalami penurunan saat musim kemarau dan debit mulai meningkat kembali setelah musim hujan berjalan 1-2 bulan. Debit mata air Krisik mencapai puncak pada bulan Mei 2010, yaitu 4 bulan setelah terjadinya puncak curah hujan di bulan Januari 2010 (Gambar 26 a). Mata air Complang menghasilkan debit maksimum pada bulan Juli 2010, yaitu 6 bulan setelah terjadinya puncak curah hujan di bulan Januari 2010. Sedangkan mata air Pusung Pegat mengalami puncak debit di bulan Juli 2010, yaitu 6 bulan setelah terjadinya puncak curah



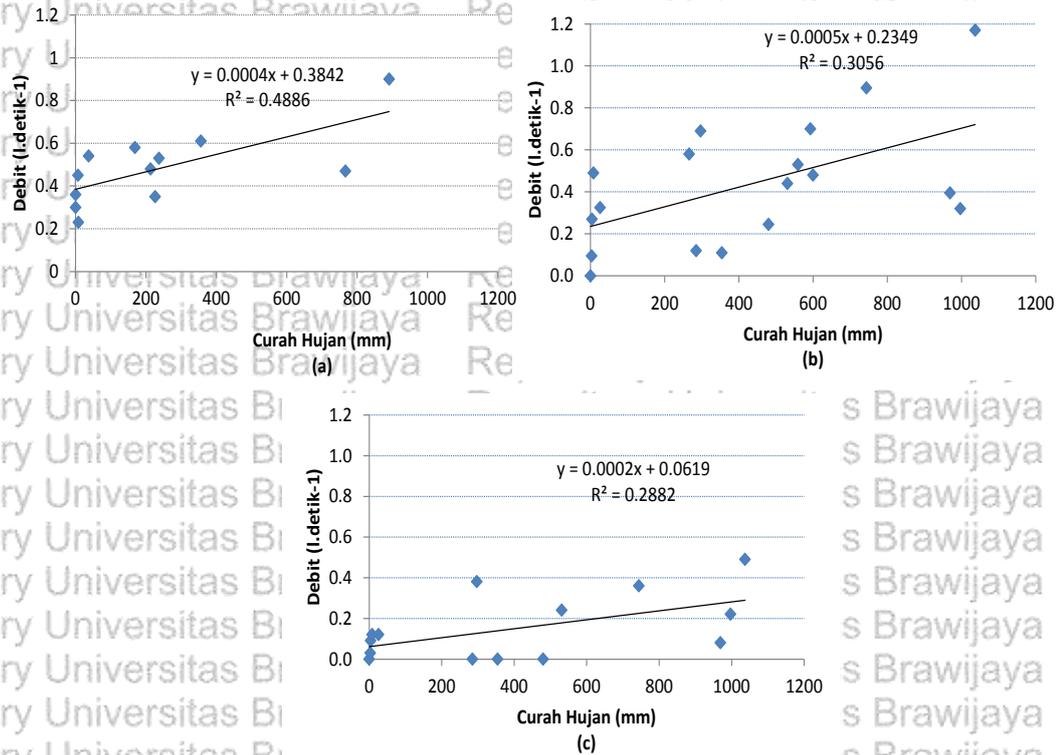
hujan di bulan Januari 2010. Pada mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat terlihat adanya selisih waktu 4-6 bulan (*residence time*) antara kejadian puncak curah hujan dan puncak debit. Hal ini menunjukkan waktu pengisian akuifer mata air Krisik oleh curah hujan terjadi selama 4-5 bulan, sedangkan mata air Complang dan Pusung Pegat membutuhkan waktu 6-7 bulan. Seperti yang dilaporkan Tim Survei Tanah Universitas Brawijaya bahwa data debit aliran di Bendungan Selorejo pada tahun 1951 - 1972 berkisar antara $5-7 \text{ m}^3 \cdot \text{detik}^{-1}$ pada bulan-bulan Juli-Oktober dan berkisar antara $14-17 \text{ m}^3 \cdot \text{detik}^{-1}$ pada bulan Januari sampai Maret. Nilai rata-rata bulanan tertinggi adalah $33 \text{ m}^3 \cdot \text{detik}^{-1}$ pada bulan Februari 1960, sedangkan rata-rata bulanan terendah adalah $3,1 \text{ m}^3 \cdot \text{detik}^{-1}$ pada bulan Oktober 1964 dan 1965. Data tersebut menggambarkan pengaruh musim kemarau dan periode relatif lama (dua bulan) untuk mengisi kembali akuifer dan untuk menormalkan aliran dasar. Data tersebut juga menunjukkan bahwa aliran yang terjadi selama musim kemarau mempunyai hubungan erat dengan jumlah curah hujan pada musim hujan yang terjadi sebelumnya (Anonimous, 1984).

Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menunjukkan perbedaan fluktuasi debit, dimana fluktuasi debit terkecil ditunjukkan oleh mata air Krisik. Penurunan debit mata air ini tidak menyebabkan pengeringan. Sedangkan mata air Complang dan Pusung Pegat menunjukkan fluktuasi debit lebih besar, dimana penurunan debit kedua mata air ini menyebabkan pengeringan selama 1 dan 4 bulan (Gambar 26 b dan 26 c). Terjadinya pengeringan debit pada mata air Complang dan Pusung Pegat, selain disebabkan variasi curah hujan, juga oleh lamanya pengisian kembali air tanah (6 bulan) ke dalam akuifer mata air. Seperti disebutkan oleh Rai *et al.* (1998) bahwa fluktuasi debit mata air terutama disebabkan oleh besarnya variasi curah hujan di daerah resapan atau lebih tepatnya variasi jumlah air hujan yang berinfiltrasi ke dalam tanah dan mengisi kembali air tanah. Variasi debit yang terlihat hanya sesaat setelah hujan menunjukkan cepatnya infiltrasi air ke dalam tanah, kemudian mengisi air tanah dan kurva debit memperlihatkan ritme musiman periodik yang kuat.



Gambar 26. Pola hubungan curah hujan dan debit mata air dengan *standart error* (a) Krisik, (b) Complang dan (c) Pusung Pegat dalam satu tahun pengamatan (Juli 2009- Juli 2010)

Dilakukan analisis regresi hubungan antara curah hujan dan debit mata air dengan jalan menyesuaikan puncak curah hujan dengan puncak debit mata air. Asumsi yang digunakan puncak debit terjadi pada saat puncak curah hujan. Hasil analisis menunjukkan hubungan terkuat curah hujan dan debit mata air terlihat pada mata air Krisik ($R^2 = 0,5$) (Gambar 27 a). Sedangkan hubungan yang cukup kuat antara curah hujan dan debit mata air terjadi pada mata air Complang dan mata air Pusung Pegat dengan R^2 sama besar yaitu 0,3.



Gambar 27. Hubungan antara curah hujan dengan debit mata air (a) Krisik, (b) Complang dan (c) Pusung Pegat

Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat merupakan mata air berdebit kecil. Malvicini *et al.* (2005) menyebutkan mata air berdebit kecil berhubungan erat dengan curah hujan. Sebaliknya, mata air berdebit besar tidak berhubungan dengan curah hujan. Kuatnya hubungan antara curah hujan dan debit mata air Krisik disebabkan oleh karakteristik akuifernya. Akuifer mata air ini berada pada kedalaman yang lebih dangkal, yaitu 0,93 m di bawah permukaan tanah daripada kedalaman mata air Complang (1,46 m) dan Pusung Pegat (1,33 m). Umumnya aliran air yang berasal dari akuifer dangkal merupakan aliran lokal, aliran airnya berlangsung cepat dan membutuhkan waktu tinggal (*residence times*) selama beberapa jam hingga beberapa bulan (Englund, 1986). Selain itu, akuifer mata air Krisik memiliki ketebalan mencapai 12,59 m, lebih tebal dibandingkan akuifer mata air Complang dan Pusung Pegat, masing-masing 2,99 dan 1,96 m. Hal ini menyebabkan mata air Krisik memiliki potensi air tanah lebih besar.



4.4. KESIMPULAN

- Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat muncul karena perubahan kelerengan, di kaki bukit dan di dataran rendah.
- Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat dikategorikan sebagai mata air kontak. Akuifer ketiga mata air berupa batu pasir yang tidak terkonsolidasi, merupakan akuifer dangkal dengan kedalaman 0,93-1,71 m dan ketebalan mencapai 0,9 – 12,59 m.
- Ketiga mata air termasuk mata air berdebit kecil dan berfluktuasi, dimana fluktuasi debit mata air Krisik tidak sebesar mata air Complang dan Pusung Pegat. Debit mata air Krisik mengalami penurunan, tetapi tidak sampai mengering. Sedangkan debit mata air Complang dan Pusung Pegat mengering hingga 1 dan 4 bulan. Terdapat hubungan yang kuat antara curah hujan dan debit mata air Krisik ($R^2 = 0,5$), sedangkan pada mata air Complang dan Pusung Pegat hubungan tersebut cukup kuat ($R^2 = 0,3$).



V. KARAKTERISASI DAERAH RESAPAN MATA AIR : LAHAN, BIOGEOHIDROFISIK DAN VEGETASI MATA AIR KRISIK, COMPLANG DAN PUSUNG PEGAT

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat yang terdiri dari karakteristik lahan, geofisik, biofisik tanah, vegetasi dan karakteristik hidrologinya. Daerah resapan mata air ditentukan berdasarkan peta DAS mikro dan survei di lapangan. Karakteristik lahan terdiri dari luas dan kelerengan, geofisik terdiri dari kedalaman dan ketebalan akuifer, biofisik tanah terdiri dari kandungan C-organik tanah, Berat isi tanah, porositas, tekstur, kemantapan agregat dan KHJ. Sedangkan karakteristik vegetasi dinilai dari Indeks Kualitas Biodiversitas, Indeks Diversitas Jenis, kerapatan (pohon, belta dan tumbuhan bawah), penutupan kanopi dan *C-stock*. Karakteristik hidrologi diindikasikan dengan kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah. Hasil penelitian menunjukkan daerah resapan mata air Pusung Pegat lebih luas (128,56 ha) dibandingkan mata air Complang dan Krisik, yaitu masing-masing 38,37 ha dan 24,48 ha. Sebagian besar daerah resapan tersebut berupa kebun kopi multistrata dan hutan pinus. Selain juga terdapat sistem penggunaan lahan lainnya seperti kebun campuran, hortikultura/ sawah dan perumahan. Mata air Krisik memiliki kedalaman akuifer paling dangkal (0,93 m) dan paling tebal (12,59 m) dibandingkan mata air Complang dan Pusung Pegat. Umumnya, biofisik tanah di mata air Krisik hampir sama dengan mata air Pusung Pegat dan lebih baik dari Complang. Meskipun C-organik dan kemantapan agregatnya lebih rendah dari Pusung Pegat, namun tanah di mata air Krisik memiliki porositas lebih tinggi dan tanah lebih ringan (BI tanah lebih rendah). KHJ di daerah resapan mata air Krisik dan Pusung Pegat tergolong sangat cepat. Daerah resapan mata air Krisik memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas dan penutupan kanopi tertinggi. Jenis pohon yang mendominasi di mata air Krisik dan Pusung Pegat adalah pinus (*Pinus merkusii*), durian (*Durio zibethinus*) dan sengon laut (*Albizia falcataria*). Sedangkan daerah resapan mata air Complang didominasi oleh durian (*D. zibethinus*) dan sengon laut (*A. falcataria*). Kopi (*Coffea canephora* var. *robusta*) dan sengon laut (*A. falcataria*) merupakan jenis belta yang mendominasi ketiga daerah resapan. Kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah di mata air Krisik lebih tinggi dibandingkan dua mata air lainnya.

Kata kunci: biogehidrofisik, vegetasi, daerah resapan, mata air

5.1. PENDAHULUAN

Mata air merupakan salah satu sumber utama air bersih untuk air minum dan keperluan rumah tangga lainnya. Di Kecamatan Ngantang, mata air-mata air tersebut umumnya muncul di antara kaki bukit dan dataran dengan debit berkisar antara 1-200 l.detik⁻¹ (Anonimous, 2008). Mata air berdebit kecil (kurang dari 5 l.detik⁻¹) dilaporkan mengalami penurunan debit, bahkan mati dan muncul kembali setelah terjadi musim hujan selama 2 hingga 3 bulan. Sedangkan mata air berdebit besar bersifat lebih permanen, air mengalir sepanjang tahun. Mengeringnya mata air menjadi permasalahan utama, terutama untuk masyarakat



di daerah pegunungan yang bergantung pada mata air untuk memenuhi kebutuhannya.

Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat termasuk mata air di Ngantang yang berdebit kecil, debitnya sekitar 1 l.detik⁻¹. Mata air Krisik dimanfaatkan oleh penduduk untuk mandi, cuci dan air minum, sedangkan mata air Complang dan Pusung Pegat digunakan untuk pengairan. Hasil pengamatan debit mata air selama 1 tahun memperlihatkan mata air Krisik mengeluarkan air sepanjang tahun dengan fluktuasi debit yang tidak besar. Sementara itu, mata air Complang dan Pusung Pegat menghasilkan debit yang berfluktuasi dan kedua mata air ini mengering selama 1 dan 4 bulan. Hasil analisis geolistrik struktur batuan penyusunnya, ketiga mata air tersebut berasal dari akuifer bebas dan dangkal, yang terdiri dari batuan pasir tidak terkonsolidasi (lapisan permeabel) dan terletak di atas tufa atau batuan beku (lapisan kurang permeabel). Dengan demikian, mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat dikategorikan sebagai mata air kontak, yang secara alami airnya didukung oleh aliran air lokal. Mata air yang berasal dari aliran air tanah lokal, umumnya daerah resapannya tidak luas dan berada di sekitar mata air (Sada *and* Pohlman, 2006).

Debit mata air yang berasal dari akuifer bebas terutama tergantung pada curah hujan dan karakteristik daerah resapannya, seperti permeabilitas (konduktivitas hidrolis) lapisan tanah atas, struktur dan kedalaman tanah, geologi, kemiringan tanah dan permukaan tanah yang tertutup vegetasi. Fluktuasi debit mata air terutama disebabkan oleh variasi curah hujan atau variasi jumlah curah hujan yang berinfiltrasi ke dalam tanah dan menambah air tanah (*groundwater*)(Negi *and* Joshi, 2004). Pada saat ini banyak dilaporkan bahwa mengeringnya mata air, rendahnya debit di musim kemarau dan berubahnya jenis mata air perenial menjadi mata air musiman dihubungkan dengan perubahan penggunaan dan tutupan lahan, gangguan faktor biotik dan perubahan-perubahan fisik di daerah resapan mata air. Dilaporkan penebangan hutan di kawasan DAS Pegunungan Himalaya, India menyebabkan erosi, penurunan C-organik, seiring dengan penurunan resapan air ke dalam tanah, sehingga terjadi penurunan kapasitas simpanan air tanah (Negi *and* Joshi, 2002).



Alih guna hutan juga terjadi di Kecamatan Ngantang. Sejak tahun 1930, hutan alami di wilayah ini diubah menjadi kebun kopi. Pada tahun 1980-an hingga sekarang, petani mulai melakukan sistem pertanian agroforestri, dimana di antara tanaman kopi ditanam jenis-jenis bernilai ekonomi tinggi dari jenis kayu-kayuan (puspa, sengon, waru dan cempaka) dan pohon buah-buahan (durian, alpukat, kelapa, rambutan, langsep dan cengkeh). Alih guna hutan yang merubah struktur dan komposisi vegetasi menyebabkan degradasi sifat fisik tanah dan pada akhirnya mempengaruhi kontinuitas ketersediaan air. Degradasi tersebut ditunjukkan dengan kestabilan agregat rendah, penurunan tingkat porositas tanah, sehingga tanah menjadi mampat (Widianto *et al.*, 2004). Alih guna hutan menyebabkan diversitas dan jumlah vegetasi berkurang, mengakibatkan penurunan produksi seresah, aktivitas perakaran dan biota tanah. Hasil penelitian di Lampung Barat menunjukkan terjadi penurunan makroporositas tanah lahan hutan yang dirubah menjadi kopi monokultur dalam jangka waktu 3 tahun, yaitu dari 83,1% menjadi 63,7% (Suprayogo *et al.*, 2004). Keberadaan sifat fisik tanah menjadi bagian yang tidak terlepas dari mekanisme pergerakan air, khususnya resapan air ke dalam tanah.

Oleh karena mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat berdebit kecil dan memiliki akuifer dangkal, maka debit ketiga mata air juga tergantung karakteristik daerah resapannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik daerah resapan ketiga mata air, yang merupakan hubungan antara karakteristik lahan, geofisik, biofisik tanah, vegetasi dan karakteristik hidrologinya.

5.2. METODE PENELITIAN

5.2.1. Delineasi Daerah Resapan Mata Air

Delineasi daerah resapan mata air dilakukan berdasarkan karakteristik hidrogeomorfologi mata air (Tabel 11), yang merupakan hasil karakterisasi mata air di BAB IV. Dari tabel tersebut diketahui mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat merupakan jenis mata air kontak, yang memiliki akuifer dangkal. Akuifer dangkal dengan kedalaman kurang dari 50 m yang merupakan akuifer

bebas memiliki daerah resapan di atas akuifer itu sendiri (Hadian *et al.*, 2006). Berdasarkan hal tersebut, maka daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat diperkirakan berada di sekitar mata air.

Tabel 11. Hasil identifikasi dan karakterisasi hidrogeomorfologi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Mata air	Altitude (m dpl)	Debit (l.detik ⁻¹)		Akuifer		Jenis mata air	
		maks.	Bulan	min.	Bulan		
Krisik	650	0,9	Juli 2010	0,3	Des. 2009	0,93 12,59	kontak
Complang	668	1,17	Juli/Agst 2010	0	Des.- Jan. 2009-2010	1,46 2,99	kontak
Pusung Pegat	677	0,53	Juli 2010	0	Sept.- Jan. 2009-2010	1,33 1,96	kontak

Daerah resapan ditentukan dengan pendekatan peta tematik DAS mikro, yang dibuat berdasar peta topografi dengan mengambil informasi garis kontur dan drainase (Meyboom *and* Toth 1966, dalam Freeze, 1979; Mulyono, 2008; Rizal, 2009). Berdasar peta DAS mikro tersebut dilakukan survei di lapangan untuk menentukan batas-batas daerah resapan dan Sistem Penggunaan Lahan (SPL) yang terdapat di daerah resapan mata air, beserta luasnya.

5.2.2. Karakterisasi Lahan dan Geofisik

Karakterisasi Lahan meliputi penghitungan luas masing-masing SPL dan kelerengannya, yang berfungsi sebagai daerah resapan mata air. Karakteristik geofisik dicerminkan oleh karakteristik akuifer mata air, yaitu kedalaman dan ketebalannya. Metode pelaksanaan karakterisasi Lahan dan Geofisik sudah dijelaskan di Bab III dan IV.

5.2.3. Karakterisasi Biofisik Tanah

Metode pelaksanaan karakterisasi biofisik tanah sudah dijelaskan secara terperinci pada BAB III. Analisis biofisik tanah diambil dari contoh tanah pada berbagai kedalaman sesuai dengan profil tanah di tiap-tiap SPL. Umumnya pengambilan contoh tanah diulang dua kali, kecuali SPL Kopi multistrata yang memiliki luasan tertinggi dilakukan pengambilan sebanyak empat kali. Untuk memudahkan analisis data dilakukan penggolongan untuk contoh tanah pada berbagai kedalaman. Contoh tanah paling atas disebut lapisan *top soil*, kemudian



dilanjutkan dengan lapisan berikutnya *sub soil* dan *sub sub soil*. Analisis ini dilakukan pada SPL bervegetasi, yaitu SPL yang berpotensi sebagai daerah resapan. Sedangkan untuk data biofisik tanah daerah pemukiman digunakan data sekunder.

5.2.5. Karakterisasi Vegetasi

Karakteristik vegetasi ditentukan oleh stratifikasi, struktur dan komposisi, diversitas tumbuhan dan cadangan karbon (*C-stock*).

a). Stratifikasi vertikal tumbuhan terdiri dari (Indriyanto, 2005):

Stratum A : merupakan dari pohon-pohon dengan tinggi lebih dari 30 m. Pada umumnya tajuk pohon pada strata ini lebar, tidak bersentuhan ke arah horisontal dengan tajuk pohon lainnya dalam strata yang sama, sehingga strata tajuk ini berbentuk diskontinyu. Pohon pada strata ini umumnya berbatang lurus, batang bebas cabang tinggi dan bersifat *intoleran* (tidak tahan naungan).

Stratum B : merupakan lapisan tajuk ke dua dari atas yang dibentuk oleh pepohonan dengan tinggi 20-30 m. Bentuk tajuk pohon pada strata ini membulat atau memanjang dan tidak melebar. Tajuk-tajuk pohon membentuk lapisan tajuk diskontinyu.

Stratum C : merupakan lapisan ke tiga, dibentuk oleh pohon dengan ketinggian 4-20 m. Pohon pada strata ini membentuk tajuk kontinyu (berubah-ubah) dan membentuk lapisan tajuk yang tebal. Pada strata ini pepohonan juga berasosiasi dengan populasi epifit, tumbuhan memanjat dan parasit.

Stratum D : merupakan jenis semak dan perdu, yang tingginya 1-4 m. Pada strata ini juga terdapat dan dibentuk oleh jenis pohon yang masih muda atau dalam fase anakan (*seedling*), palem-paleman kecil, herba besar dan paku-pakuan besar.

Stratum E : merupakan tajuk paling bawah dibentuk oleh tumbuh-tumbuhan penutup tanah dengan tinggi 0-1 m.

b). Struktur dan komposisi vegetasi pada tingkat SPL ditentukan dengan kerapatan (individu.ha^{-1}), persentase penutupan kanopi (%) dan dominansi jenis (Quinn and Keough, 2002). Persentase penutupan kanopidihitung pada plot contoh ukuran 40 x 5 m. Semua kanopi pohon dalam area tersebut diukur luasnya pada arah sisi kanan-kiri dan depan-belakang dari pengamat. Posisi pohon dan sebaran kanopi pada lahan dipetakan pada kertas grafik dan dihitung persentase penutupan kanopi dengan asumsi sebaran kanopi pohon berbentuk lingkaran. Penutupan permukaan tanah oleh kanopi ditentukan

berdasarkan persentase total luas kanopi dibandingkan dengan luas plot (Dewi, 2007). Perhitungan luas penutupan kanopi dilakukan dengan program Adobe Photoshop 7.0. Sedangkan dominansi jenis ditentukan oleh Indeks Nilai Penting (INP), yang diperoleh dengan menjumlah Kelimpahan relatif (KR), Frekuensi relatif (FR) dan Dominansi Relatif (DR) tiap jenis tumbuhan.

$$INP = KR + FR + DR$$

c). Diversitas jenis tumbuhan ditentukan dengan Indeks Diversitas Shannon-Wiener (H'). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$H' = -\sum p_i \cdot \log p_i \quad , \quad p_i = n_i / N$$

di mana H' menyatakan Indeks Diversitas menurut Shannon & Wiener, sedangkan p_i menyatakan proporsi jenis i terhadap keseluruhan jumlah jenis yang dijumpai pada plot di dalam komunitas yang diteliti. Proporsi ini diperoleh dari perbandingan jumlah jenisnya di mana n_i merupakan jumlah individu jenis i dan N adalah jumlah seluruh individu jenis yang dijumpai dalam plot (Ludwig and Reynolds, 1988).

d). Indeks kualitas biodiversitas, digunakan untuk menyatakan kualitas biodiversitas masing-masing daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat. Indeks ini mengacu pada Indeks Kualitas Biodiversitas yang dikembangkan oleh Pagiola *et al.* (2007). Indeks Kualitas Biodiversitas menentukan Sistem Penggunaan Lahan (SPL) dengan biodiversitas terrendah (padang rumput terdegradasi dan sawah/ ladang tanaman semusim) dengan indeks 0 dan SPL dengan biodiversitas tertinggi (hutan primer) dengan indeks 1. Penentuan indeks tersebut didasarkan pada beberapa faktor, diantaranya jumlah jenis, struktur dan stratifikasi vegetasinya, ukuran plot dan produksi buahnya. Daftar Indeks Kualitas Biodiversitas pada beberapa jenis SPL menurut Pagiola *et al.* (2007) terdapat pada Lampiran 1.

e) Cadangan karbon (C) (*C-stock*): merupakan kemampuan vegetasi dalam menyimpan karbon. Dilakukan estimasi *C-stock* masing-masing SPL di daerah resapan mata air dengan mengacu pada metoda RaCSA yang dikembangkan oleh ICRAF (Hairiah *et al.*, 2010). Semua pohon dan pohon kecil diukur diameter setinggi dada (dbh) dan dicari berat jenis (BJ) kayunya



dari <http://www.worldagroforestrycentre.org/sea>. Biomassa masing-masing pohon dapat diestimasi menggunakan persamaan alometrik yang telah dikembangkan sebelumnya (Tabel 12).

Tabel 12. Persamaan allometrik yang digunakan untuk menghitung biomassa pohon

No.	Jenis pohon	Persamaan allometrik	Sumber
1.	Pohon bercabang	$Y=0.11 \rho D^{2.62}$	Kettering <i>et al.</i> , 2001
2.	Pohon tidak bercabang	$Y=(\pi/40) \rho H D^2$	Hairiah <i>et al.</i> , 2002
3.	Kopi	$Y=0.2811 D^{2.0635}$	Arifin, 2001; Van Noordwijk, 2002
4.	Pisang	$Y=0.0303 D^{2.1345}$	Arifin, 2001; Van Noordwijk, 2002
5.	Sengon	$Y=0.0272 D^{2.831}$	Sugiarto, 2001; Van Noordwijk, 2002
6.	Bambu	$Y=0.1312 D^{2.2784}$	Priyadarsini, 1998
7.	Pinus	$Y=0.0417 D^{2.6576}$	Waterloo, 1995
8.	Jika data ρ tidak ada	$Y=0.118 D^{2.53}$	Brown, 1997

Catatan: Y= Biomasa kering, kg/pohon; H=tinggi tanaman, cm; D= diameter batang (cm) setinggi 1,3 m; ρ =BJ kayu, $Mg m^{-3}$ atau $kg dm^{-3}$ atau $g cm^{-3}$

Selanjutnya cadangan karbon per pohon dapat diestimasi dengan mengalikan biomassa dengan kandungan karbon vegetasi (0,46) (Hairiah dan Rahayu, 2007).

Karakterisasi vegetasi dilakukan pada plot-plot sampel dengan jumlah plot yang disesuaikan dengan luasan masing-masing SPL (Tabel 13). Karakterisasi vegetasi hanya dilakukan pada SPL yang memiliki vegetasi, yaitu SPL yang berpotensi sebagai daerah resapan mata air. Pada SPL hortikultura/ sawah, karakterisasi dilakukan hanya pada tumbuhan bawah. Sedangkan pada SPL pemukiman tidak dilakukan karakterisasi vegetasi.

Tabel 13. Lokasi dan jumlah plot contoh karakterisasi vegetasi pada masing-masing SPL di daerah resapan tiga mata air

No.	Sistem Penggunaan Lahan (SPL)	Jumlah plot		
		Krisik	Complang	Pusung Pegat
1.	Kopi multistrata	8	10	15
2.	Pinus	2	-	4
3.	Hortikultura/ sawah	-	-	-
4.	Pemukiman	-	-	-
5.	Kebun campuran	2	-	-

5.2.6. Karakterisasi Hidrologi

Karakteristik hidrologi daerah resapan terdiri dari kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung

Pegat. Metode penelitiannya sudah dijabarkan dalam BAB III.

5.2.7. Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam dua skala yang berbeda, yaitu analisis data di antara SPL-SPL pada masing-masing daerah resapan mata air (skala SPL) dan analisis data di antara ketiga daerah resapan mata air (skala lanskap). Pada skala SPL, karakteristik lahan, geofisik dan vegetasi masing-masing mata air ditabulasi dan dikompilasi menggunakan *Microsoft Excel 2007*, kemudian dianalisis secara deskriptif. Sedangkan data biogeohidrofisik dianalisis ANOVA dengan program *Minitab14*. Hasil ANOVA menunjukkan ada/ tidaknya perbedaan karakteristik biogeohidrofisik di antara SPL dalam satu daerah resapan mata air. Jika nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ dan $P-value < 0,05$, maka dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan di antara karakteristik tersebut. Untuk mengetahui karakteristik SPL mana yang berbeda antara satu dengan lainnya, dilakukan uji lanjutan dengan Tukey atau biasa dikenal dengan Uji Beda Nyata Terkecil (BNT).

Analisis data per daerah resapan mata air dilakukan secara deskriptif. Karakteristik biogeohidrofisik di suatu daerah resapan mata air merupakan nilai karakteristik biogeohidrofisik dari SPL-SPL yang sesuai dengan proporsi luas SPL di masing-masing mata air. Karakteristik vegetasi (kerapatan pohon, belta dan tumbuhan) per daerah resapan merupakan jumlah dari masing-masing karakter yang dikalikan luas SPL. Sedangkan karakteristik vegetasi lainnya, yaitu penutupan kanopi merupakan jumlah dari penutupan kanopi sesuai dengan proporsi luas SPL.

5.3. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.3.1. Delineasi Daerah Resapan Mata Air

Hasil delineasi daerah resapan tiga mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat. Pada Tabel 14 diketahui mata air Pusung Pegat memiliki daerah resapan paling luas dibandingkan dengan daerah resapan mata air Complang dan Krisik. Luas daerah resapan mata air Pusung Pegat mencapai 128,56 ha. Sedangkan luas daerah resapan mata air Complang dan Krisik berturut-turut 38,37 dan 24,48 ha.

Daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat terdiri dari beberapa Sistem Penggunaan Lahan (SPL). Daerah resapan mata air Krisik terdiri dari empat SPL, yaitu Kopi multistrata, Pinus, Hortikultura/sawah dan Kebun

campuran. Daerah resapan mata air Complang terdiri dari SPL Kopi multistrata dan pemukiman. Sedangkan daerah resapan mata air Pusung Pegat juga terdiri dari empat SPL, yaitu SPL Kopi multistrata, Pinus, Hortikultura/sawah dan Pemukiman. Luas tiap jenis SPL yang terdapat pada ketiga daerah resapan mata air terdapat pada Tabel 14, sedangkan definisi masing-masing SPL terdapat pada Tabel 15.

Tabel 14. SPL pada daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat beserta luas masing-masing SPL

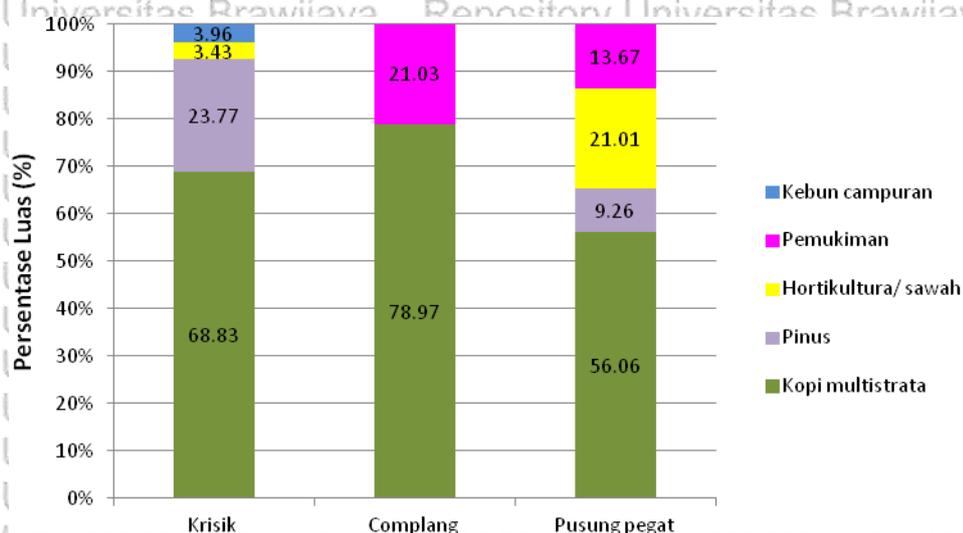
No.	Sistem Penggunaan Lahan (SPL)	Luas (ha)		
		Krisik	Complang	Pusung Pegat
1.	Kopi multistrata	16,85	30,3	72,07
2.	Pinus	5,82	-	11,9
3.	Hortikultura/sawah	0,84	-	27,01
4.	Pemukiman	-	8,07	17,58
5.	Kebun campuran	0,97	-	-
	Jumlah	24,48	38,37	128,56

Tabel 15. Sistem Penggunaan Lahan (SPL) dan definisinya

SPL	Definisi
Kopi multistrata	sistem budidaya kopi, dimana kopi ditanam di bawah pohon-pohon penayang seperti dadap (<i>Erythrina subumbar</i>), lamtoro (<i>Leucaena glauca</i>) dan sengon (<i>Albizia falcataria</i>), serta bercampur dengan beberapa tanaman lain yang memberikan hasil seperti tanaman buah-buahan, sayuran, kacang-kacangan, dan tanaman obat-obatan (Verbist <i>et al.</i> , 2004). Jumlah jenis pohon penayang lebih dari 5 jenis. SPL ini dikenal sebagai Agroforest kopi (Hairiah dan Rahayu, 2010)
Pinus	Merupakan bentuk agroforestri sederhana, di bawah tegakan pinus biasanya ditanami rumput gajah, pisang atau kopi
Hortikultura/sawah	Sistem pertanian tanaman semusim, dimana terdapat pergiliran tanaman antara jagung, lombok, jenis sayur-sayuran dan padi.
Pemukiman	Merupakan kombinasi antara jalan pekarangan dan bangunan rumah
Kebun campuran	Kebun terdiri dari berbagai jenis pepohonan seperti jengkol, petai, dan berbagai pohon penghasil timber. Pada bagian bawahnya ditumbuhi jenis-jenis tanaman liar.

Pada Gambar 28 terlihat bahwa Kopi multistrata merupakan SPL yang mendominasi di daerah resapan ketiga mata air. Di mata air Krisik, SPL Kopi multistrata menempati 68,83 % dari luas keseluruhan daerah resapannya. SPL Pinus memiliki persentase luas tertinggi ke dua di daerah resapan mata air ini

(23,77 %). Sedangkan SPL Hortikultura/ sawah dan Kebun campuran hanya menempati sekitar 3 %. Sebagian besar daerah resapan mata air Complang merupakan SPL Kopi multistrata, mencapai 78,97 % dari luas keseluruhan dan sisanya merupakan daerah pemukiman (21,03 %). Kopi multistrata mendominasi daerah resapan mata air Pusung Pegat sebesar 56,06 %. Selain itu, terdapat juga SPL Pinus yang menempati daerah ini hingga 21,01 %, SPL Hortikultura/ sawah sebesar 9,26 % dan SPL Pemukiman 13,67 %. SPL Pemukiman merupakan SPL yang sudah tidak berfungsi lagi sebagai daerah resapan, karena tidak adanya vegetasi dan sedikitnya air yang dapat diresapkan ke dalam tanah. Dengan demikian, semakin luasnya SPL ini justru akan mengurangi luas kawasan yang bisa berfungsi sebagai daerah resapan mata air.



Gambar 28. Persentase luas SPL pada daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

5.3.2. Karakteristik Lahan

Luas SPL pada daerah resapan tiap mata air merupakan salah satu indikator karakteristik lahan, disamping kelerengannya. Luas daerah resapan dan luas tiap SPL yang ada di dalamnya sudah dijelaskan di atas. Sedangkan hasil pengamatan kelerengan masing-masing SPL di daerah resapan tiga mata air terdapat pada Tabel 16. Pada ketiga daerah resapan mata air SPL Kopi multistrata terdapat pada kisaran kelerengan 8-25%. Dalam klasifikasi kelas kemiringan lereng, SPL ini masuk dalam kelas landai hingga agak curam

(Puslitanak, 2003). SPL Pinus memiliki kelerengan 20-25% di mata air Krisik dan Pusung Pegat (agak curam). SPL Hortikultura/ sawah di ketiga mata air memiliki kelerengan paling kecil, yaitu 5% (agak landai). Sedangkan SPL Kebun campuran di mata air Krisik memiliki kelerengan 15% (landai).

Tabel 16. Kelerengan tiap SPL di masing-masing daerah resapan

No.	SPL	Kelerengan (%)		
		Krisik	Complang	Pusung Pegat
1	Kopi multistrata	8-25	8-20	8-20
2	Pinus	25		20
3	Hortikultura/ sawah	5		5
4	Pemukiman		15	15
5	Kebun campuran	15		

Hasil analisis kelerengan per daerah resapan menunjukkan bahwa Krisik memiliki kelerengan tertinggi yaitu 18 %, diikuti dengan Complang (14%) dan Pusung Pegat (12 %). Lereng pada daerah resapan mata air Krisik masuk dalam kelas agak curam. Sedangkan lereng pada Complang dan Pusung Pegat masuk dalam kelas lereng landai (Puslitanak, 2003). Dengan kelas kelerengan tersebut, ketiga daerah resapan mata air memiliki kemampuan tinggi untuk meresapkan air tanah. Selain memperbesar jumlah aliran permukaan, semakin curamnya lereng akan memperbesar energi angkut air. Jika kemiringan lereng semakin tinggi, maka jumlah butir-butir tanah yang terpercik ke bawah oleh tumbukan butir hujan akan semakin banyak. Hal ini disebabkan gaya berat yang semakin besar sejalan dengan semakin miringnya permukaan tanah dari bidang horizontal, sehingga lapisan tanah atas yang tererosi akan semakin banyak (Arsyad, 2000). Infiltrasi pada lereng curam bisa ditingkatkan dengan penutupan tanah dengan jenis rumput-rumputan (Joshi and Tambe, 2010).



Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya

Repository

Repository U

Repository Universitas Brawijaya

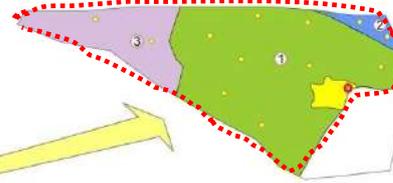
Repository U

Repository

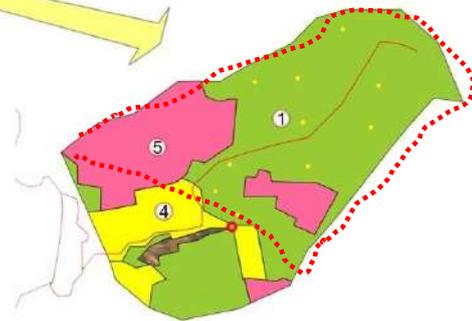
ository



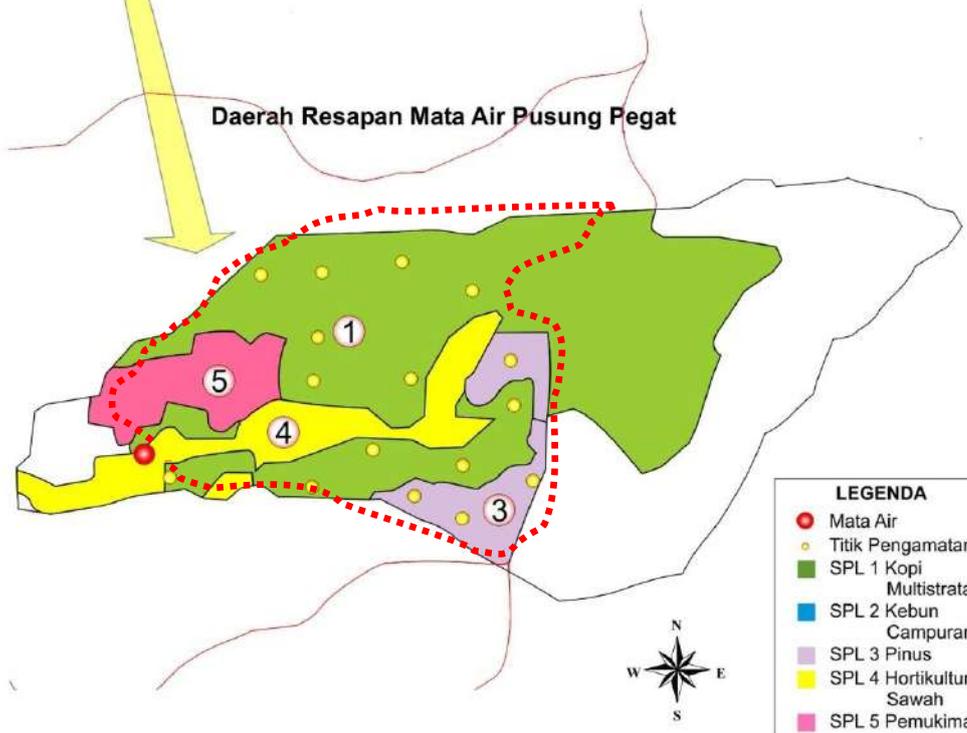
Daerah Resapan Mata Air Krisik



Daerah Resapan Mata Air Complang



Daerah Resapan Mata Air Pusung Pegat

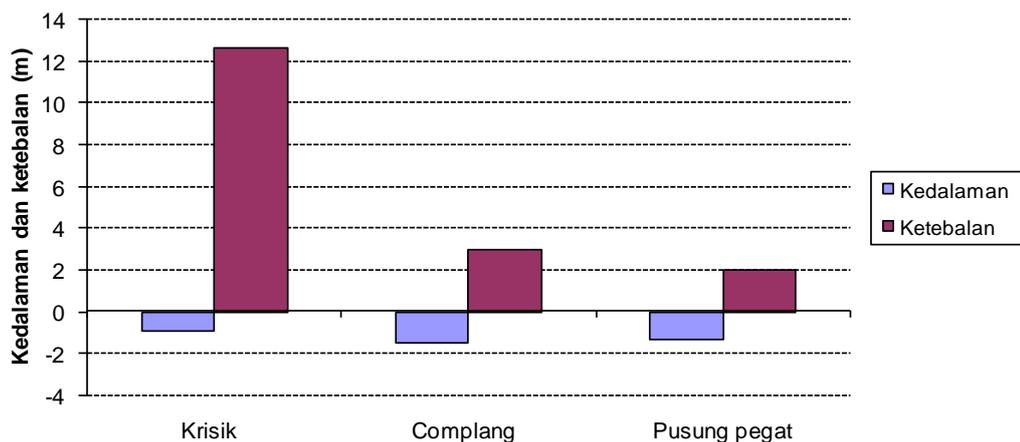


- LEGENDA**
- Mata Air
 - Titik Pengamatan
 - SPL 1 Kopi
 - SPL 2 Kebun
 - SPL 3 Pinus
 - SPL 4 Hortikultura/Sawah
 - SPL 5 Pemukiman

Gambar 29. Peta daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat
Keterangan : perkiraan daerah resapan

5.3.3. Karakteristik Geofisik

Karakteristik geofisik terdiri dari karakteristik akuifer mata air. Karakteristik akuifer (kedalaman dan ketebalan) sudah dibahas di Bab IV. Berdasarkan data geolistrik, yang sudah disesuaikan dengan data kedalaman sumur penduduk, diketahui daerah resapan mata air Krisik memiliki akuifer dengan kedalaman terdangkal yaitu 0,93 m. Berikutnya mata air Pusung Pegat memiliki rata-rata kedalaman akuifer sebesar 1,33 m, dan mata air Complang memiliki akuifer dengan rata-rata kedalaman terjauh dari permukaan tanah yaitu 1,46 m. Untuk karakteristik ketebalan, mata air Krisik memiliki akuifer paling tebal yaitu 12,59 m, diikuti mata air Complang memiliki rata-rata ketebalan akuifer 2,99 m. Sedangkan daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki rata-rata ketebalan akuifer paling tipis yaitu 1,81 m (Gambar 30).



Gambar 30. Kedalaman dan ketebalan akuifer di tiga daerah resapan mata air

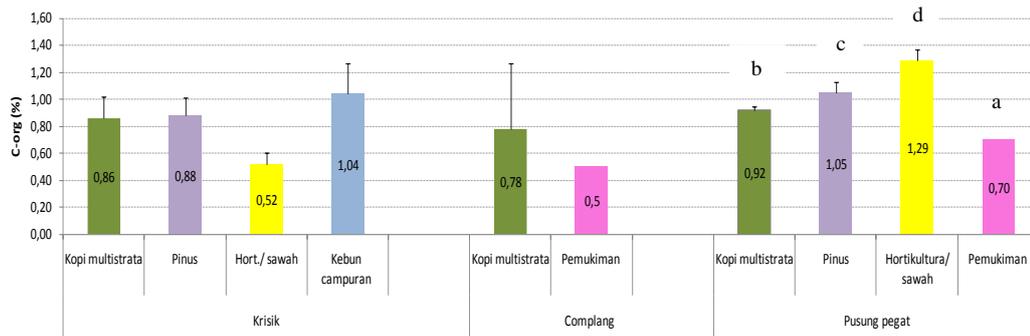
5.3.4. Karakteristik Biofisik Tanah

5.3.4.1. Karakteristik biofisik tanah antara SPL-SPL di tiap daerah resapan mata air Mata Air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

a. C-organik

Kandungan C-organik diamati hanya pada lapisan *top soil*. Di daerah resapan mata air Krisik, keempat SPL memiliki kandungan C-organik yang sama ($P > 0,05$), yaitu berkisar antara 0,58 – 1,04 %. Di daerah resapan mata air Complang, SPL Kopi multistrata memiliki kandungan C-organik sama dengan

SPL Pemukiman ($P > 0,05$), yaitu 0,78 % dan 0,5%. Sedangkan hasil ANOVA kandungan C-organik di daerah resapan mata air Pusung Pegat menunjukkan perbedaan nyata ($F=18,79$; $P=0,019$) di antara SPLnya. SPL Hortikultura/ sawah memiliki kandungan C-organik tertinggi ($1,29 \pm 0,078$ %), kemudian diikuti SPL Pinus ($1,05 \pm 0,085$ %), SPL Kopi multistrata ($0,92 \pm 0,028$ %) dan SPL pemukiman (0,7%) (Gambar 31).

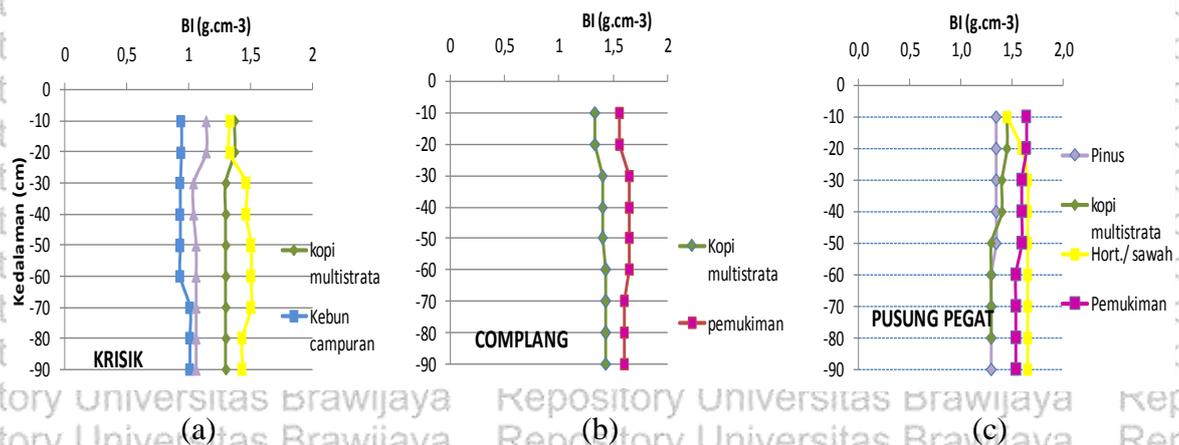


Gambar 31. Kandungan C-organik tanah pada berbagai SPL di tiga daerah resapan mata air. Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata

b. Berat Isi (BI) tanah

Berat Isi tanah pada semua lapisan tanah antar SPL di daerah resapan mata air Krisik menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$). SPL Kebun campuran memiliki BI terendah ($\leq 1 \text{ g.cm}^{-3}$) di tiga lapisan tanahnya, diikuti dengan BI di SPL Pinus dan SPL Kopi multistrata. SPL Hortikultura/ sawah memiliki BI tanah tertinggi di semua lapisan tanah. Hal ini menunjukkan SPL Kebun campuran memiliki kepadatan tanah paling rendah dan SPL Hortikultura/ sawah memiliki kepadatan tanah paling tinggi (Gambar 32).

Berat Isi tanah pada SPL Kopi multistrata dan pemukiman di daerah resapan di mata air Complang tidak menunjukkan perbedaan nyata. Tanah di daerah ini cukup tinggi, yaitu $1,32-1,64 \text{ g.cm}^{-3}$. Sedangkan pada daerah resapan mata air Pusung Pegat, BI tanah pada empat SPL tidak menunjukkan perbedaan ($P > 0,05$) di lapisan *top soil* dan *sub soil*nya. Pada bahan induknya, BI tanah berbeda nyata ($F=29,86$; $P=0,01$) di antara empat SPL. SPL Pinus memiliki BI terendah ($1,3 \text{ g.cm}^{-3}$), diikuti SPL Kopi multistrata ($1,4 \text{ g.cm}^{-3}$). SPL Hortikultura/ sawah memiliki BI tanah tertinggi, yang sama dengan BI pemukiman, yaitu $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$.

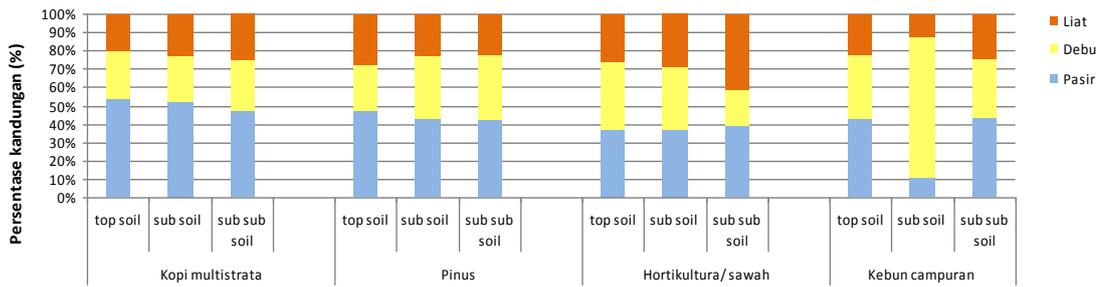


Gambar 32. Berat Isi (BI) tanah berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di tiga daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung Pegat

c. Tekstur tanah

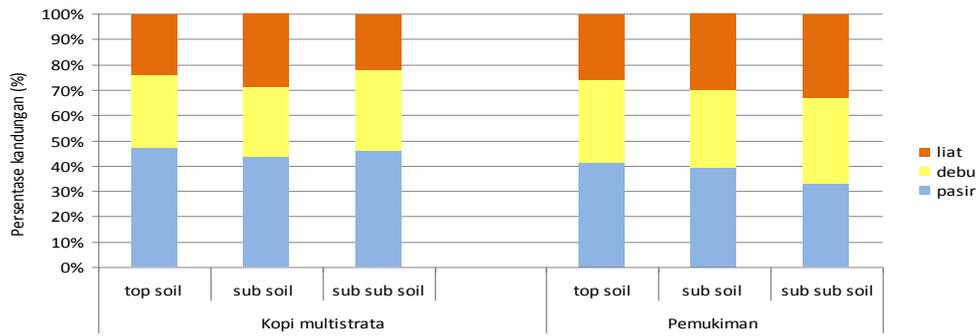
Secara umum, tekstur tanah tiap lapisan tanah pada masing-masing SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat memiliki penyusunan yang sama, dimana kandungan pasir paling dominan dibandingkan debu dan liat.

Kandungan pasirnya berkisar antara 37-64%, kemudian diikuti debu (20-39%) dan liat (11-42%). Hasil ANOVA menunjukkan kandungan pasir di empat SPL di daerah resapan mata air Krisik berbeda nyata yaitu pada lapisan *top soil* ($F=15,01$; $P=0,012$) dan *sub soil* ($F=40,41$; $P=0,002$). SPL Kopi multistrata memiliki kandungan pasir paling tinggi pada *top soil*, diikuti dengan SPL Pinus, Kebun campuran dan Hortikultura/ sawah. Pada lapisan *sub soil*, SPL Kopi multistrata juga memiliki kandungan pasir tertinggi, diikuti SPL Pinus, Hortikultura/ sawah dan Kebun campuran. Kandungan debu menunjukkan perbedaan nyata pada tiga lapisan tanah ($P < 0,05$) di empat SPL. Persentase kandungan debu tertinggi ketiga lapisan tanah berbeda-beda. Pada *top soil*, SPL yang memiliki kandungan debu tertinggi adalah SPL Hortikultura/ sawah ($38 \pm 1,4$ %), pada *sub soil* adalah SPL Kebun campuran ($77,0 \pm 14,14$ %) dan pada *sub-sub soil* adalah SPL Kopi multistrata ($47 \pm 8,48$ %). Sedangkan kandungan liat berbeda nyata di antara keempat SPL hanya pada bahan induknya. SPL Hortikultura/ sawah memiliki kandungan liat tertinggi ($41,5 \pm 0,71$ %) dibandingkan SPL lainnya (Gambar 33).



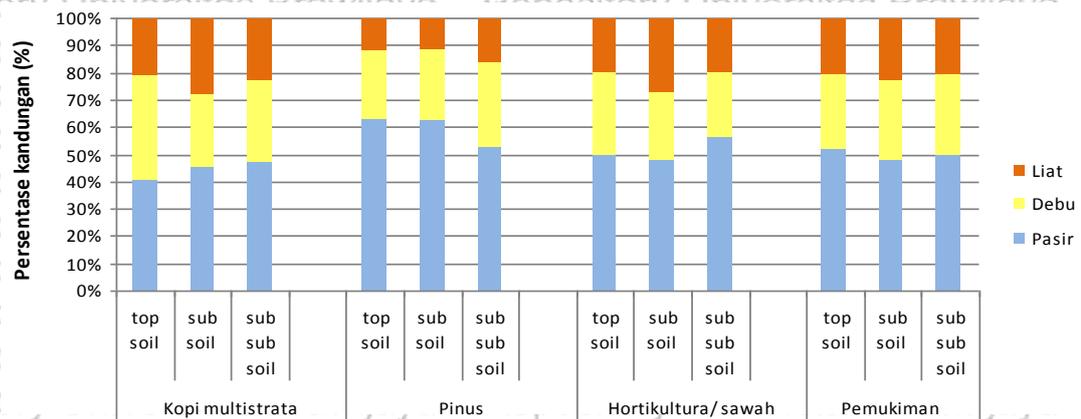
Gambar 33. Kandungan pasir, debu dan liat pada tekstur tanah pada empat SPL di daerah resapan mata air Krisik

Tekstur tanah pada semua lapisan pada SPL daerah resapan mata air Complang sebagian besar terdiri atas pasir (44-47%), diikuti debu (28-32%) dan liat (22-29%). Hasil ANOVA menunjukkan tidak terdapat perbedaan nyata antara kandungan pasir, debu dan liat di antara SPL Kopi multistrata dan pemukiman (Gambar 34).



Gambar 34. Kandungan pasir, debu dan liat pada tekstur tanah pada dua SPL di daerah resapan mata air Complang

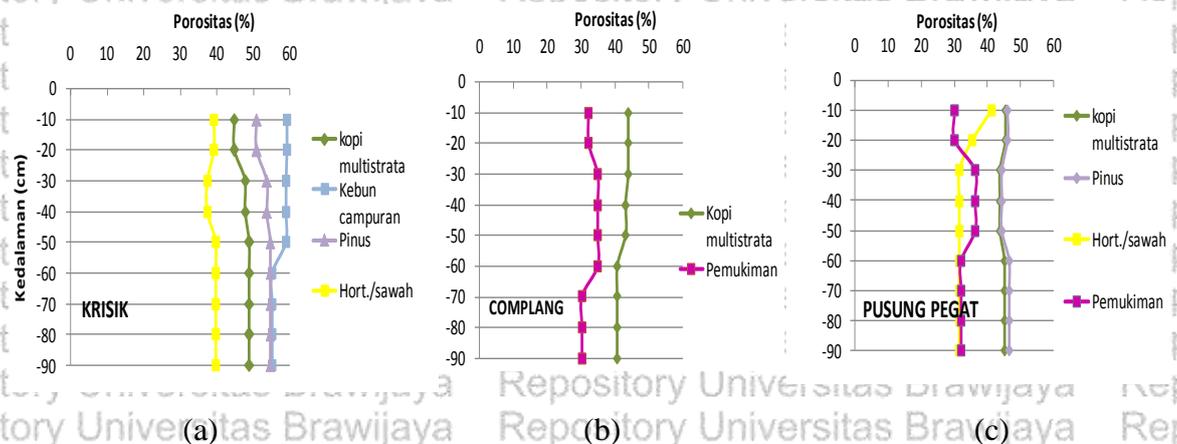
Di daerah resapan mata air Pusung Pegat, kandungan pasir tidak berbeda nyata di antara SPL-SPL penyusunnya. Kandungan pasir di mata air Pusung Pegat ini cukup tinggi, berkisar 41-64%. Kandungan debu menunjukkan perbedaan nyata hanya di lapisan atas, dimana SPL Kopi multistrata memiliki kandungan debu tertinggi, yaitu $38,5 \pm 2,12$ % dan SPL Hortikultura memiliki kandungan debu terendah sebesar $24,5 \pm 2,12$ %. Sedangkan kandungan liat pada tekstur di mata air ini tidak menunjukkan perbedaan nyata di antara SPL-SPL nya, kandungannya berkisar antara 10,5-28% (Gambar 35).



Gambar 35. Kandungan pasir, debu dan liat pada tekstur tanah pada empat SPL di daerah resapan mata air Pusung Pegat

d. Porositas tanah

Porositas di daerah resapan mata air Krisik menunjukkan perbedaan nyata pada ketiga lapisan tanahnya di berbagai SPL ($P < 0,05$). SPL Kebun campuran memiliki porositas paling tinggi di ketiga lapisan tanahnya. Porositas SPL ini mencapai sebesar $59,35 \pm 1,34$ % pada *top soil* dan menurun dengan semakin meningkatnya kedalaman tanah. Jumlah porositas yang tinggi juga ditunjukkan oleh SPL Pinus, yaitu $51 \pm 0,42$ % pada *top soil*nya, tetapi porositas meningkat dengan semakin meningkatnya kedalaman tanah. Sedangkan SPL Kopi multistrata memiliki porositas sebesar $44,83 \pm 2,5$ % dan juga meningkat dengan meningkatnya kedalaman tanah. Hortikultura/ sawah memiliki porositas paling rendah di antara empat SPL tersebut, yaitu mencapai $37,5 - 39,75$ % (Gambar 36).



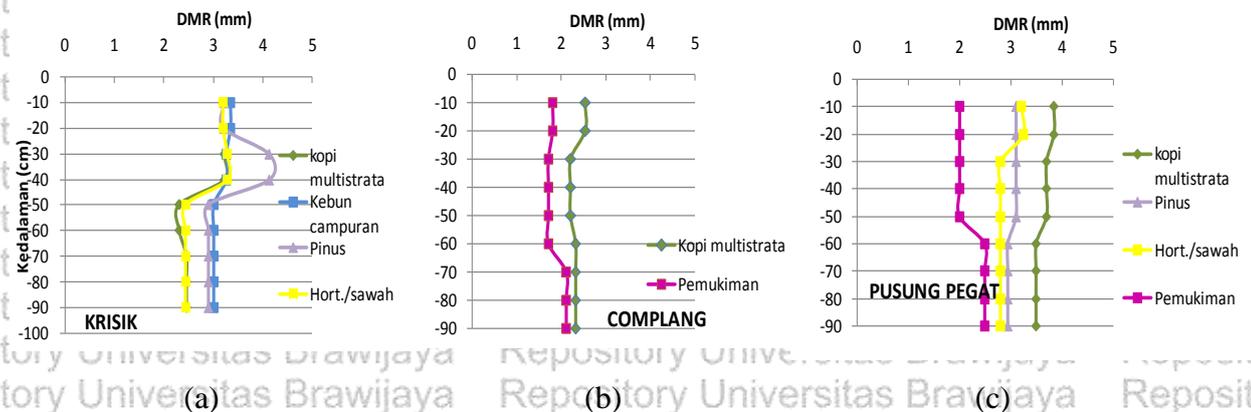
Gambar 36. Porositas tanah berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di tiga daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung Pegat

Porositas tanah tidak menunjukkan perbedaan nyata antara SPL Kopi multistrata dan pemukiman di daerah resapan mata air Complang ($P > 0,05$). Porositas SPL kopi multistrata berkisar antara 40,65-43,90%, sedangkan porositas SPL pemukiman berkisar antara 30-35%.

Porositas tanah tidak berbeda nyata pada *top soil* dan *sub soil* di antara keempat SPL di daerah resapan mata air Pusung Pegat ($P > 0,05$). Porositas tanah di kedua lapisan ini berkisar antara 30-46%. Sedangkan perbedaan nyata terlihat pada porositas tanah pada lapisan bahan induk ($F= 15,22; P= 0,025$). SPL Pinus memiliki porositas tertinggi (46,6%), sama dengan porositas SPL Kopi multistrata (45,1%). Sedangkan SPL pemukiman dan Hortikultura/ sawah memiliki porositas tanah terendah, berturut-turut 31,55 dan 32%.

e. Kemantapan agregat tanah

Kemantapan agregat tanah ditunjukkan dengan besarnya nilai Indeks diameter massa rata-rata (DMR), yang menunjukkan kemampuan tanah dalam menghadapi tekanan dari luar. Hasil ANOVA menunjukkan DMR tanah pada ketiga lapisan tanah tidak menunjukkan perbedaan nyata di antara SPL-SPL yang terdapat di mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat. Kemantapan agregat keempat SPL di daerah resapan mata air Krisik berkisar antara 2,31-4,13 mm. Kemantapan agregat di daerah resapan mata air Complang berkisar antara 1,7 - 2,54 mm. Sedangkan kemantapan agregat di mata air Pusung Pegat berkisar 2 - 3,85 mm (Gambar 37).

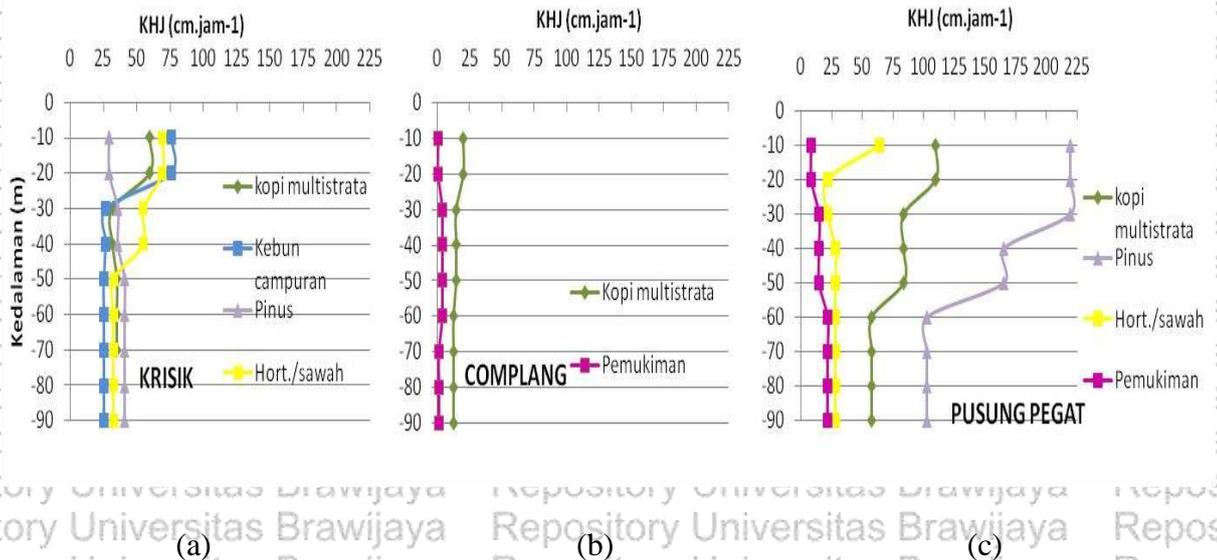


Gambar 37. Kemantapan agregat berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di tiga daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung Pegat

f. Konduktivitas Hidroulik Jenuh

Konduktivitas Hidroulik Jenuh (KHJ) merupakan karakteristik fisik tanah yang menyatakan besarnya kemampuan tanah dalam meneruskan air. KHJ menunjukkan perbedaan nyata ($F=16,31$; $P=0,01$) pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, hanya pada lapisan *top soil*. Pada lapisan ini, SPL Kebun campuran memiliki KHJ tertinggi ($75,85 \pm 7,57 \text{ cm.jam}^{-1}$), sama dengan KHJ dari SPL Hortikultura/ sawah ($69,20 \pm 4,81 \text{ cm.jam}^{-1}$). KHJ terrendah dimiliki oleh SPL Pinus sebesar $29,45 \text{ cm.jam}^{-1}$ dan nilainya meningkat dengan semakin meningkatnya kedalaman tanah (Gambar 38).

Di daerah resapan mata air Complang, KHJ pada SPL Kopi multistrata tidak menunjukkan perbedaan nyata ($P > 0,05$) dengan SPL Pemukiman. KHJ di daerah resapan mata air ini berkisar antara $0,4-20,13 \text{ cm.jam}^{-1}$ per lapisan tanahnya. Demikian juga dengan KHJ di daerah resapan mata air Pusung Pegat tidak menunjukkan perbedaan nyata di antara SPL-SPLnya ($p > 0,05$). SPL Pinus memiliki kecenderungan KHJ tinggi mencapai $219,95 \text{ cm.jam}^{-1}$ dan berkurang pada lapisan-lapisan tanah dibawahnya. Akan tetapi, tingginya KHJ tersebut tidak berbeda nyata dengan KHJ pada SPL Kopi multistrata, Hortikultura/ sawah dan Pemukiman.



Gambar 38. Kondultivitas Hidroulik Jenuh (KHJ) berbagai SPL pada tiga kedalaman tanah di daerah resapan mata air (a) Krisik; (b) Complang; (c) Pusung Pegat



Dari karakteristik biofisik tanah per SPL di tiap-tiap mata air di atas terlihat bahwa pada daerah resapan mata air Krisik, umumnya SPL Kebun campuran memiliki sifat biofisik tanah paling baik dibandingkan SPL lainnya. Kandungan C-organik di SPL Kebun campuran tertinggi (1,04%), tetapi tidak berbeda nyata jika dibandingkan dengan SPL Kopi multistrata, Pinus dan Hortikultura/ sawah. C-organik SPL ini masih tergolong rendah dibandingkan dengan SPL Hutan terganggu di Kecamatan Ngantang yang mencapai 2,65 % (Saputra, 2008). Demikian pula kemantapan agregat tanah di SPL Kebun campuran tidak berbeda nyata dengan kemantapan agregat pada ketiga SPL lainnya. Namun demikian, BI tanah dari SPL ini terendah di tiga lapisan tanahnya dan porositas tanah juga paling tinggi di *top soil* (hampir mencapai 60%) dengan pola menurun di lapisan tanah bawahnya. Porositas SPL ini lebih tinggi dibandingkan porositas tanah Hutan terganggu (48,12%) (Saputra, 2008). Tingginya porositas tanah tersebut diikuti pula dengan tingginya KHJ pada *top soilnya*. Sedangkan pada lapisan tanah bawahnya, KHJ di Kebun campuran menurun dan tidak menunjukkan perbedaan dengan SPL lainnya. Berdasar nilai KHJ, KHJ tanah dari keempat SPL di daerah mata air Krisik tergolong sangat cepat ($KHJ > 12,5 \text{ cm.jam}^{-1}$) (Landon, 1984). Tekstur tanah dari SPL Kebun campuran masuk dalam kelas lempung, dengan kandungan tertingginya adalah pasir. Dengan karakteristik biofisik tanah demikian, maka akan mempengaruhi besarnya kecepatan infiltrasi dan kapasitas simpanan air tanah, sehingga mendukung proses pengisian air tanah (*ground water*).

Pada daerah resapan mata air Complang, karakteristik biofisik tanah pada SPL Kopi multistrata dan Pemukiman tidak menunjukkan perbedaan nyata. Kandungan C-organik di dua SPL ini hanya $< 1\%$, sehingga tergolong rendah jika dibandingkan dengan SPL Hutan terganggu sebesar 2,65% (Saputra, 2008). Berat Isi tanah di kedua SPL ini termasuk tinggi ($> 1,3 \text{ g.cm}^{-3}$) dan semakin meningkat pada lapisan tanah di bawahnya. Porositas tanah dan kemantapan agregat kedua SPL ini juga tidak berbeda nyata dan lebih rendah dari porositas SPL Hutan terganggu (48,12%) dan kemantapan agregat Hutan terganggu (4,67 mm) (Saputra, 2008). Sedangkan KHJ di dua SPL ini tergolong sangat lambat hingga sangat cepat. Kelas tekstur tanah pada dua SPL ini tergolong dalam kelas lempung



dengan variasi mulai dari lempung liat berpasir dan lempung berliat. Dalam hubungannya dengan infiltrasi sangat penting diketahui adanya lapisan tanah yang dapat menghambat pergerakan air ke dalam tanah. Lapisan penghambat tersebut dapat berupa batuan induk, lapisan padas ataupun lapisan tanah yang mempunyai daya hantar air yang rendah (porositas rendah). Adanya peningkatan kandungan liat akan menyebabkan pori tanah mikro semakin meningkat sehingga pergerakan air terhambat (Hanafiah, 2005).

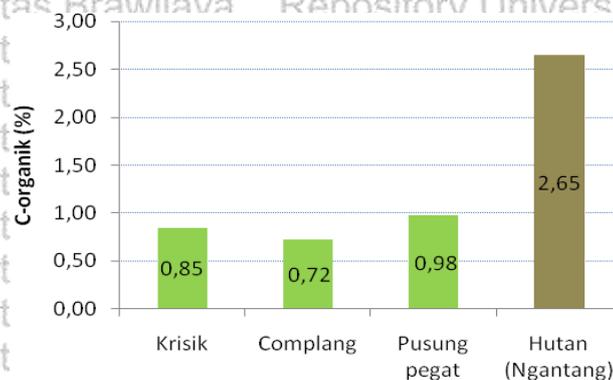
Pada daerah resapan mata air Pusung Pegat, kandungan C-organiknya berbeda nyata di antara empat SPL yang ada. Tingginya C-organik di SPL Hortikultura/sawah disebabkan karena pemberian pupuk kandang pada pertanaman rumput gajah, cabai dan jagung. Demikian juga tingginya C-organik pada SPL Pinus disebabkan karena pemberian pupuk kandang pada pertanaman rumput gajah dan kopi, yang umumnya dilakukan di bawah tegakan pinus. Tingginya C-organik di SPL Hortikultura tidak diikuti dengan rendahnya BI tanah. Berat Isi tanah di SPL ini sama dengan BI di Pemukiman, lebih tinggi dibandingkan SPL Kopi multistrata dan SPL Pinus. Pada umumnya BI tanah di empat SPL $\geq 1,3 \text{ g.cm}^{-3}$, sehingga merupakan tanah-tanah berat. Porositas tanah di lapisan *top soil* dan *sub soil* tidak menunjukkan perbedaan di antara keempat SPL. Lebih rendahnya BI di SPL Pinus dan Kopi multistrata diikuti dengan tingginya porositas di lapisan bahan induknya, tetapi tergolong masih kurang baik (40-50%) (Arsyad, 2000). Sedangkan porositas di SPL Hortikultura dan pemukiman tergolong jelek (30-40%). Selain berkaitan dengan porositas tanah, tingginya C-organik diikuti oleh tingginya kemantapan agregat SPL Pinus dan Kopi multistrata yang memiliki kecenderungan tinggi (3-4 mm), namun tidak berbeda nyata dengan SPL lainnya. Daerah resapan mata air ini memiliki KHJ tergolong cepat ($\text{KHJ} = 8-12,5 \text{ cm.jam}^{-1}$) hingga sangat cepat ($\text{KHJ} > 12,5 \text{ cm.jam}^{-1}$) pada keempat SPL nya. Tingginya nilai KHJ pada SPL-SPL ini di lapisan *top soil* dan *sub soil*nya disebabkan tekstur tanahnya termasuk dalam kelas lempung berpasir. Sedangkan menurunnya KHJ pada *sub soil* disebabkan meningkatnya persentase kandungan liat, sehingga teksturnya termasuk dalam kelas liat dan lempung berliat. SPL Pinus dan kopi multistrata memiliki KHJ cenderung sangat tinggi dikarenakan perakaran pinus dan jenis

pohon di kedua SPL tersebut. Dengan demikian, secara nyata SPL Pinus dan Kopi multistrata memiliki biofisik tanah (BI, porositas) lebih baik dibandingkan SPL Hortikultura dan pemukiman. Sedangkan kemantapan agregat dan KHJ di antara keempat SPL nya sama.

5.3.4.2. **Karakteristik biofisik tanah di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat**

a. **C-organik tanah**

Hasil analisis kandungan C-organik tanah di ketiga daerah resapan mata air menunjukkan daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki C-organik (0,98%) tertinggi dibandingkan dengan mata air Krisik dan Complang (Gambar 39). Kandungan C-organik di ketiga daerah tersebut tergolong rendah, karena kadar C-organik dikatakan tinggi jika C-organik sebesar 3-5% (Hardjowigeno, 1987). Jika dibandingkan dengan C-organik di Hutan terganggu (Ngantang) yaitu 2,65% (Saputra, 2008), C-organik di ketiga daerah resapan jauh lebih rendah. Hutan terganggu (Ngantang) merupakan jenis hutan yang sudah tidak alami lagi, karena hutan ini sudah dirambah manusia

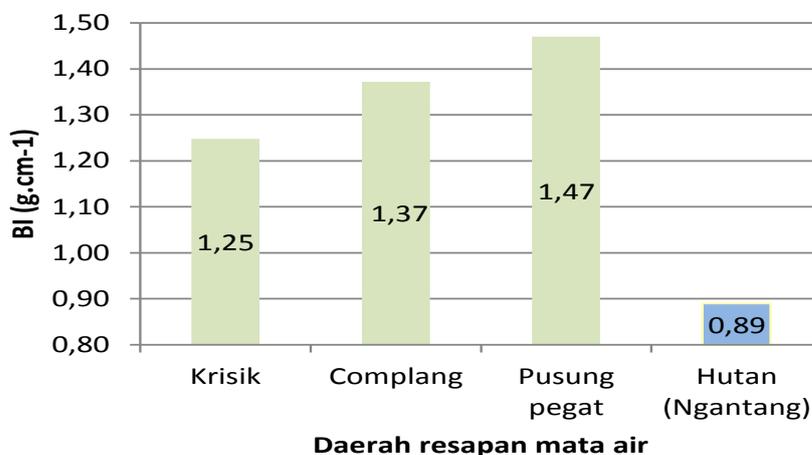


Gambar 39. Kandungan C-organik tanah di tiga daerah resapan mata air

b. **Berat Isi (BI) tanah**

Berat Isi tanah di ketiga daerah resapan mata air menunjukkan nilai yang tinggi, yaitu lebih besar dari 1 g.cm^{-3} . Daerah resapan mata air Krisik memiliki BI terendah dan daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki BI tertinggi (Gambar 40). Dengan demikian, tanah di Pusung Pegat memiliki kepadatan tanah

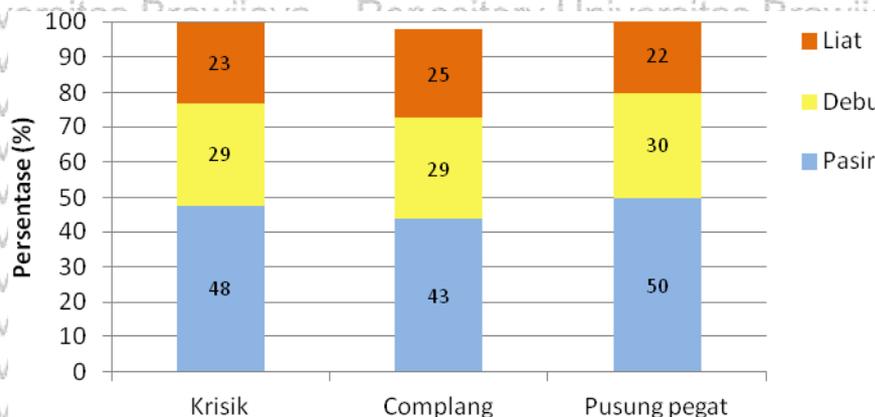
tinggi. Jika dibandingkan dengan BI hutan terganggu (Ngantang), BI tanah di ketiga daerah resapan mata air lebih padat dari hutan.



Gambar 40. Berat Isi Tanah di tiga daerah resapan mata air

c. Tekstur tanah

Pada umumnya tekstur tanah di ketiga daerah resapan mata air hampir sama, baik kandungan pasir, debu dan liatnya (Gambar 41). Persentase kandungan pasir tertinggi dibandingkan dengan debu dan liat. Daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki kandungan pasir dan debu tertinggi dibandingkan dengan Krisik dan Pusung Pegat. Sedangkan kandungan liat tertinggi dimiliki oleh mata air Complang, diikuti dengan Krisik dan Pusung Pegat.

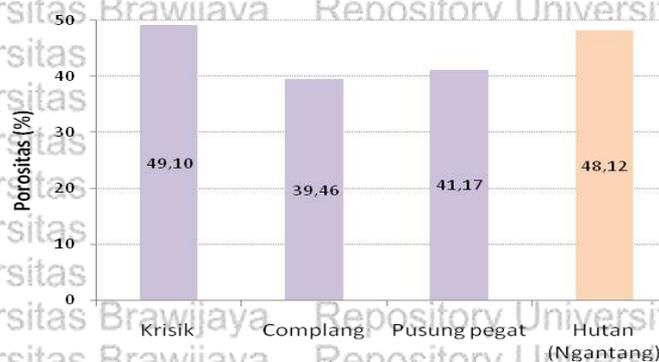


Gambar 41. Persentase pasir, debu dan liat pada tekstur di tiga daerah resapan mata air



d. Porositas

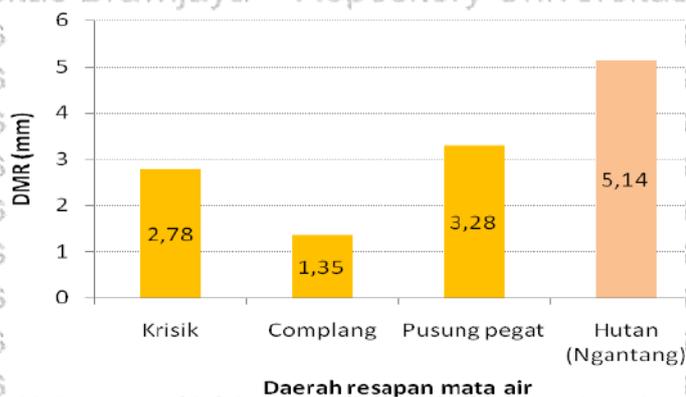
Porositas tanah di daerah resapan mata air Krisik tertinggi (49,16%) dibandingkan dengan porositas tanah di mata air Pusung Pegat (41,17 %) dan Complang (39,46 %) (Gambar 42). Porositas tanah tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan porositas hutan terganggu Ngantang (48,12%), namun masih jauh lebih kecil daripada porositas hutan primer di Sulawesi Tengah (69,09%) (Monde *et al.*,2008).



Gambar 42. Porositas tanah di tiga daerah resapan mata air

e. Kemantapan agregat (DMR)

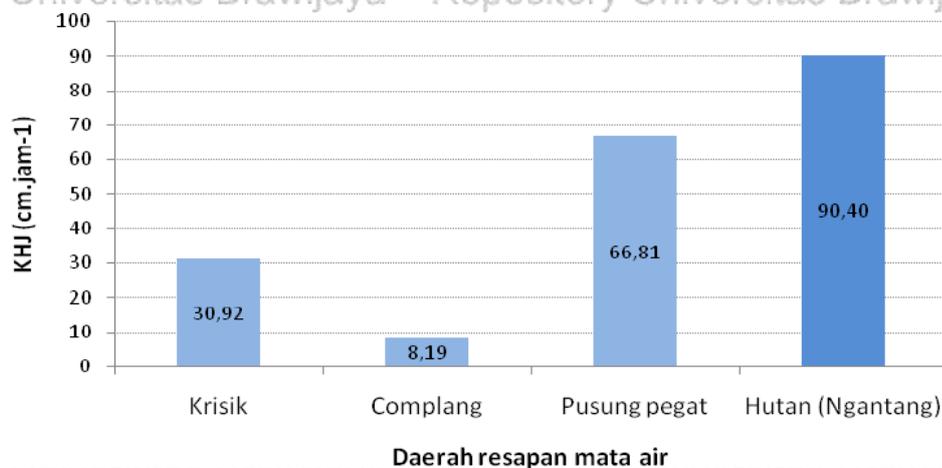
Kemantapan agregat tanah yang dinyatakan dengan Indeks DMR menunjukkan daerah resapan Pusung Pegat memiliki indeks DMR tertinggi (3,28 mm) dibandingkan dengan daerah resapan mata air Krisik (2,78) dan Complang (1,35) (Gambar 43). Akan tetapi kemantapan agregat di Pusung Pegat masih lebih rendah dari kemantapan agregat di hutan terganggu Ngantang (Saputra, 2008).



Gambar 43. Kemantapan agregat tanah di tiga daerah resapan mata air

f. **Konduktivitas Hidroulik Jenuh (KHJ)**

Daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki KHJ tertinggi, sebesar $66,81 \text{ cm.jam}^{-1}$ (Gambar 44). KHJ di daerah resapan mata air Krisik sebesar $30,92 \text{ cm.jam}^{-1}$ dan KHJ di Complang sebesar $8,19 \text{ cm.jam}^{-1}$. Besarnya KHJ di ketiga daerah resapan mata air tersebut lebih rendah jika dibandingkan KHJ di hutan terganggu Ngantang, yang mencapai $90,40 \text{ cm.jam}^{-1}$ (Saputra, 2008).



Gambar 44. Konduktivitas Hidroulik Jenuh di tiga daerah resapan mata air

Rendahnya kandungan C-organik pada tiga daerah resapan mata air ($\leq 1\%$), nampaknya disebabkan tekstur tanahnya yang didominasi pasir. Tanah bertekstur pasir mempunyai luas permukaan yang lebih kecil, sehingga sulit menyerap (menahan) air dan unsur hara (C-organik). Pusung Pegat memiliki C-organik tertinggi dibandingkan Krisik dan Complang. Hal ini nampaknya bisa dihubungkan dengan lebih luasnya daerah resapan mata air Pusung Pegat, yang diikuti dengan peningkatan kerapatan dan jenis pohon, belta dan tumbuhan bawah, sehingga seresah yang dihasilkan lebih banyak dan lebih beragam. Tingginya C-organik tanah tidak diikuti dengan rendahnya BI tanah, BI tanah Pusung Pegat tertinggi dibandingkan daerah resapan dua mata air lainnya. Tingginya BI ini dikaitkan dengan tekstur tanah yang termasuk kelas lempung berpasir, lempung liat berpasir dan liat memiliki BI tinggi ($1,3-1,8 \text{ g.cm}^{-3}$). Tingginya C-organik tanah di Pusung Pegat menyebabkan kemantapan agregat



tanah tertinggi dibandingkan dua mata air lainnya, meskipun porositas tanahnya lebih rendah dari Krisik. Tingginya kemantapan agregat dan porositas tanah dapat meningkatkan KHI tanah, sehingga daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki KHI tertinggi dibandingkan Krisik dan Complang. Meskipun lebih rendah dari KHI hutan, KHI di Pusung Pegat dimasukkan dalam kelas sangat cepat ($KHI > 12,5 \text{ cm.jam}^{-1}$) (Landon, 1984).

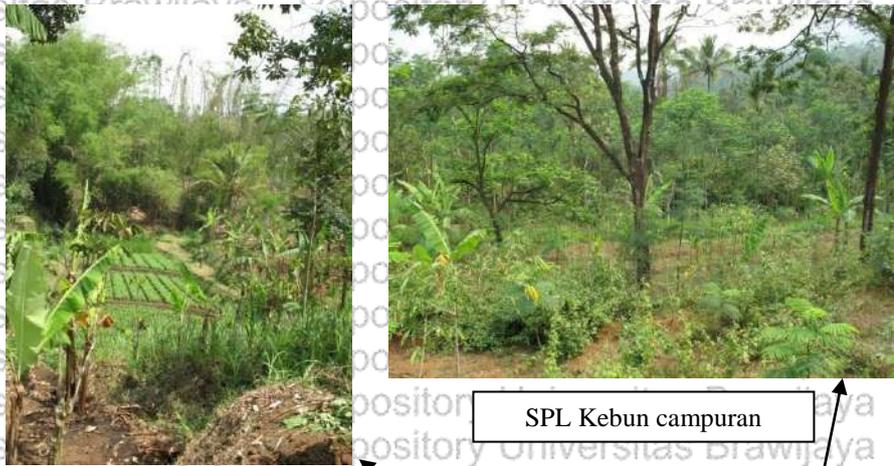
Kandungan C-organik di mata air Krisik lebih rendah dari Pusung Pegat, tetapi lebih tinggi dari Complang. Berat Isi tanah di Krisik yang tergolong rendah, diikuti dengan tingginya porositas tanah. Porositas tanah ini lebih besar dari porositas hutan terganggu, namun tingginya porositas tidak diikuti dengan naiknya KHI tanah. Akan tetapi KHI tanah Krisik masih tergolong sangat cepat ($KHI > 12,5 \text{ cm.jam}^{-1}$).

Rendahnya C-organik tanah di Complang diikuti dengan tingginya BI tanah dan rendahnya porositas tanah. Tingginya BI tanah disebabkan tanah di daerah ini bertekstur lempung, lempung berliat dan lempung liat berpasir.

Rendahnya porositas tanah berkaitan pula dengan rendahnya kemantapan agregat. Hal ini akan menyebabkan KHI tanah juga rendah. Namun demikian KHI di daerah resapan mata air Complang ini masih termasuk dalam kelas cepat ($8-12,5 \text{ cm.jam}^{-1}$).

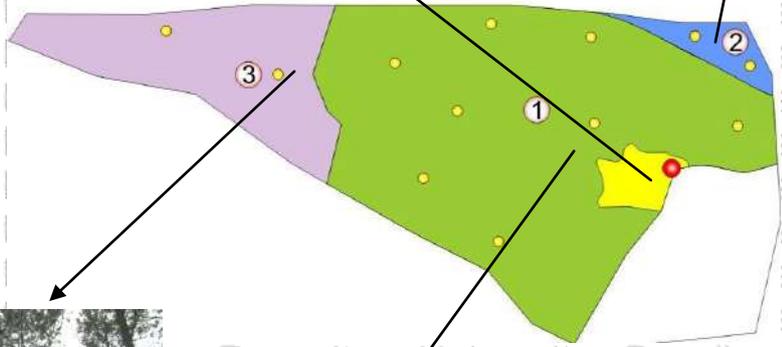
Berdasarkan karakteristik biofisik tanah di atas, maka daerah resapan mata air Krisik memiliki biofisik tanah hampir sama dengan mata air Pusung Pegat, tetapi lebih baik dari mata air Complang. Meskipun C organik di mata air Krisik lebih rendah dari Pusung Pegat, akan tetapi BI tanah Krisik lebih rendah dan porositasnya lebih tinggi dibandingkan Pusung Pegat dan Complang.

Kemantapan agregat di mata air Krisik lebih kecil daripada di Pusung Pegat. Sedangkan KHI mata air Krisik masih tergolong sangat cepat, meskipun nilai KHI nya lebih kecil daripada Pusung Pegat. Pada tanah dengan BI rendah, porositas tinggi dan KHI sangat cepat, diharapkan jumlah curah hujan dapat masuk ke dalam tanah (infiltrasi tinggi).



SPL Hortikultura/ sawah

SPL Kebun campuran



SPL Pinus



SPL Kopi multistrata

Gambar 45. Profil vegetasi di daerah resapan mata air Krisik



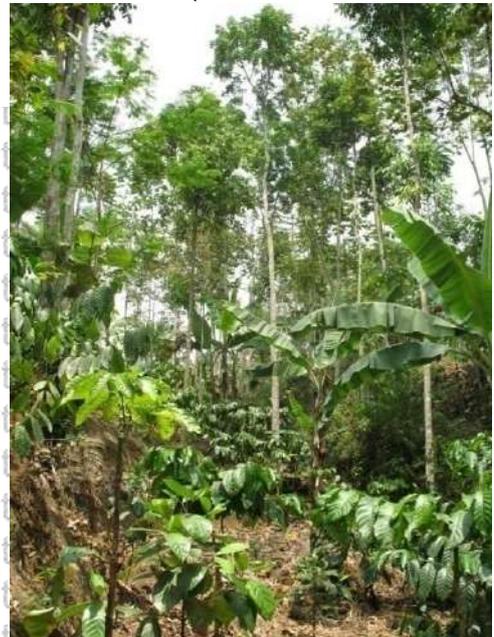
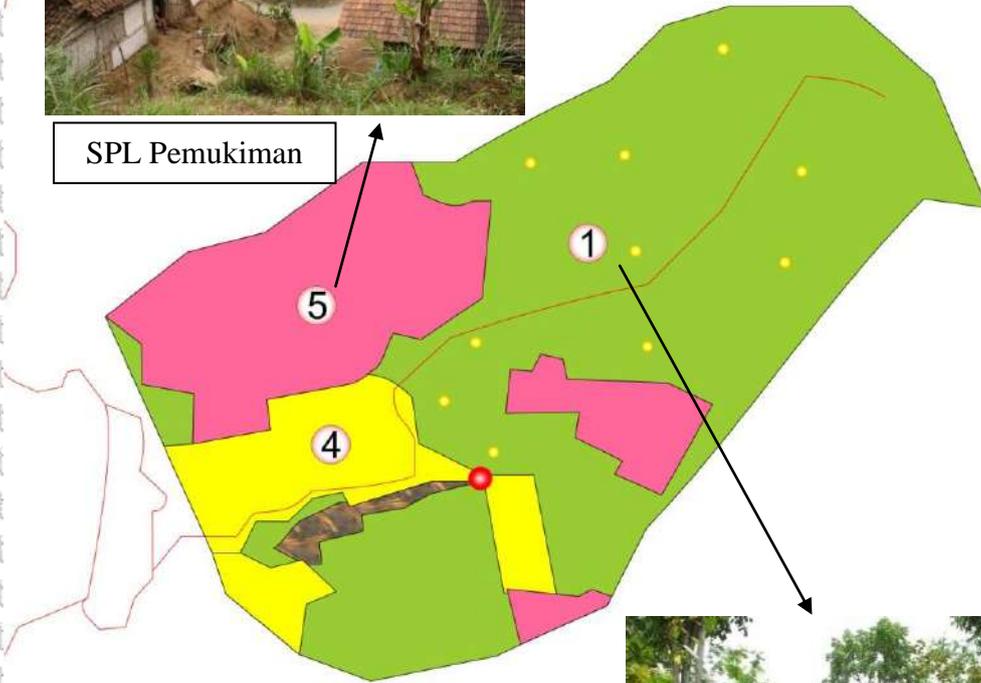
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya



SPL Pemukiman

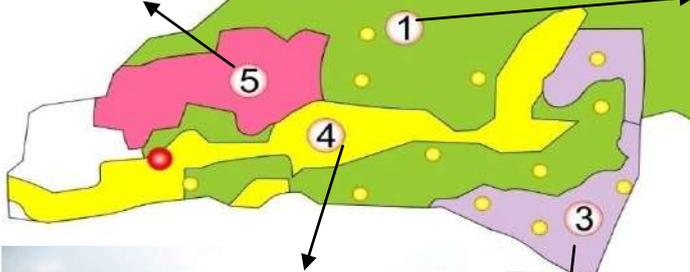


SPL Kopi multistrata

Gambar 46. Profil vegetasi di daerah resapan mata air Complang



SPL Pemukiman



SPL Kopi multistrata



SPL Hortikultura/ sawah



SPL Pinus

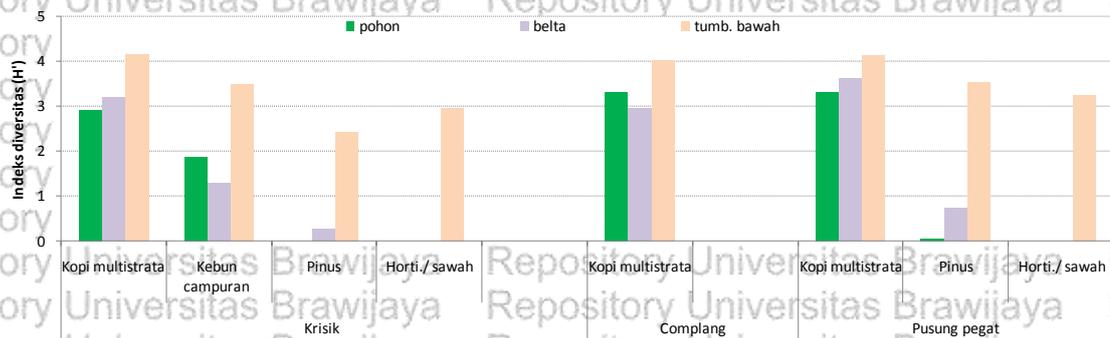
Gambar 47. Profil vegetasi di daerah resapan mata air Pusung Pegat

5.3.5. Karakteristik Vegetasi

5.3.5.1. Karakteristik vegetasi pada tiap SPL di masing-masing daerah resapan mataair

a. Diversitas Jenis tumbuhan

Di daerah resapan mata air Krisik, Indeks diversitas Shannon-Wiener (H') pohon pada SPL Kopi multistrata dengan nilai 2,91, lebih tinggi dari H' pada SPL Kebun campuran ($H' = 1,87$) dan Pinus ($H' = 0$). Indeks diversitas belta pada SPL Kopi multistrata di mata air Krisik ($H' = 3,2$), lebih tinggi dari H' belta di SPL Kebun campuran ($H' = 1,28$) dan Pinus ($H' = 0,27$). Indeks diversitas pohon dan belta pada SPL Kopi multistrata di mata air Complang, berturut-turut 3,31 dan 2,95. Indeks diversitas pohon pada SPL Kopi multistrata di daerah resapan mata air Pusung Pegat adalah 3,31. Sedangkan indeks diversitas beltanya cukup tinggi mencapai 3,62. Nilai H' pohon dan belta pada SPL Pinus sangat rendah, yaitu 0,04 dan 0,73 (Gambar 48).



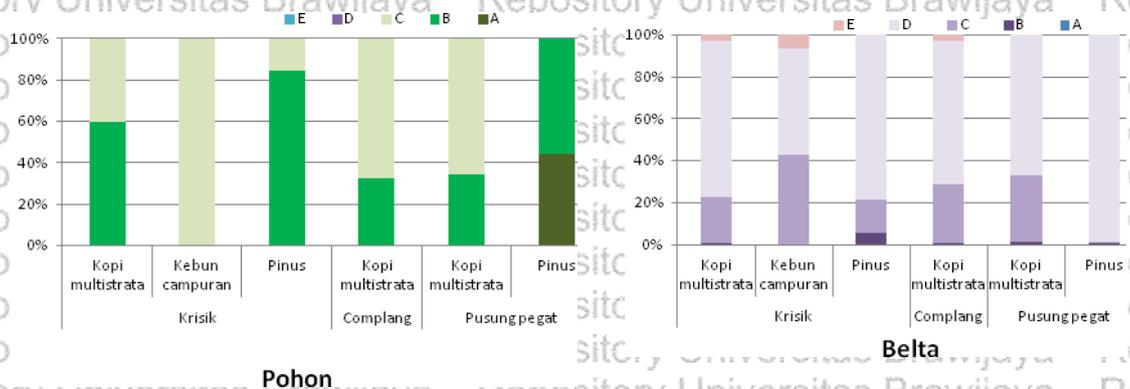
Gambar 48. Indeks diversitas (H') pohon, belta dan tumbuhan bawah pada SPL-SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Untuk diversitas tumbuhan bawah, SPL Kopi multistrata di daerah resapan mata air Krisik memiliki H' tumbuhan bawah tertinggi dibandingkan tiga SPL lainnya, mencapai 4,15. Diikuti kemudian dengan H' tumbuhan bawah di SPL Kebun campuran, Hortikultura/ sawah dan Pinus, berturut-turut 3,48, 2,94 dan 2,41. Indeks diversitas tumbuhan bawah di SPL Kopi multistrata mata air Complang mencapai 4,02. Sedangkan H' tumbuhan bawah pada SPL yang sama di mata air Pusung Pegat sebesar 4,12, kemudian H' tumbuhan bawah di Pinus dan Hortikultura/ sawah, masing-masing 3,53 dan 3,24.

Indeks diversitas jenis bisa dijadikan sebagai indikator bagi kestabilan suatu ekosistem. Nilai H' berkisar 0-7, H' dinyatakan rendah apabila lebih kecil dari 2 sedang apabila berkisar 2-4, dan tinggi apabila lebih besar dari 4 (Barbour *et al.* 1987). Semakin tinggi H' maka ekosistem tersebut semakin stabil. SPL Kopi multistrata memiliki H' pohon, H' belta dan H' tumbuhan bawah tertinggi. H' pohon dan H' belta SPL Kopi multistrata di tiga mata air termasuk dalam kategori sedang. Sedangkan H' pohon dan belta di SPL Pinus dan Kebun campuran termasuk rendah. Rendahnya H' tersebut menunjukkan adanya dominansi suatu jenis. Sedangkan H' tumbuhan bawah di semua SPL masuk dalam kategori sedang hingga tinggi.

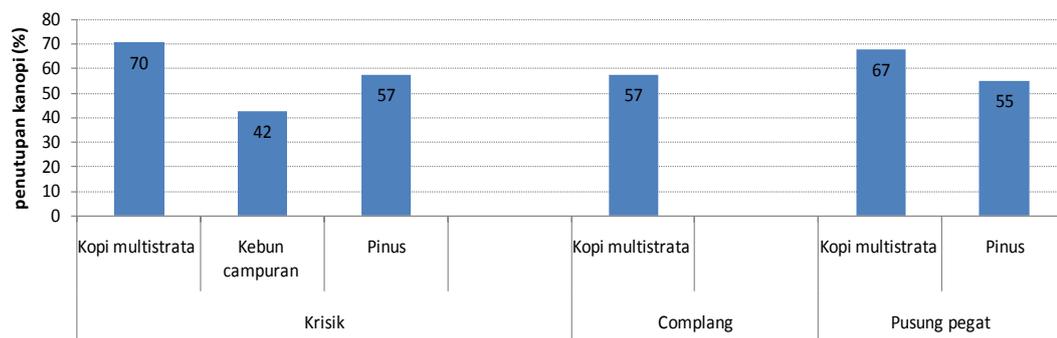
b. Struktur vegetasi

Stratifikasi pohon dan perdu pada masing-masing SPL di daerah resapan ketiga mata air menunjukkan stratifikasi lengkap (A-E). SPL Kopi multistrata memiliki stratum terlengkap, B-E. Kelompok pohon pada stratum C (tinggi 4-20 m) mendominasi sebagian besar SPL, bahkan pada SPL Kebun campuran di mata air Krisik ditempati pohon dengan stratum C dengan kelimpahan mendekati 100%. Pohon dengan stratum B (tinggi 20-30 cm) mendominasi di SPL Kopi multistrata (Krisik) dan Pinus (Pusung Pegat). Pada SPL Pinus (Pusung Pegat) masih ditemukan pohon-pohon dengan stratum A (tinggi > 30m) hingga 43%. Sedangkan kelompok belta pada stratum D (tinggi 1-4 m), yaitu jenis kopi mendominasi seluruh SPL di daerah resapan tiga mata air. Terdapat pula komunitas belta dengan stratum E, meskipun dalam jumlah sangat kecil (3-6%).



Gambar 49. Profil stratifikasi pohon dan belta pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Penutupan kanopi menggambarkan penutupan permukaan tanah pada tiap SPL oleh kanopi vegetasi. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa terdapat perbedaan penutupan kanopi pada SPL-SPL yang ada di daerah resapan mata air Krisik. SPL Kopi multistrata memiliki penutupan kanopi tertinggi sebesar 70%. Penutupan kanopi di SPL Pinus mencapai 57% dan SPL Kebun campuran sebesar 42%. Demikian juga penutupan kanopi pada SPL Kopi multistrata di daerah resapan mata air Pusung Pegat mencapai 67%, lebih tinggi dari penutupan pada SPL Pinus sebesar 55% (Gambar 50). Di daerah resapan mata air Complang, SPL Kopi multistrata memiliki penutupan kanopi sebesar 57%. Penutupan kanopi pada SPL-SPL di ketiga daerah resapan ketiga mata air lebih rendah dari penutupan kanopi pada hutan alami di Lampung sebesar 100% dan pada hutan terganggu sebesar 82% (Dewi, 2007). Akan tetapi penutupan tersebut hampir sama dengan Agroforestri berbasis pohon kopi dan kopi monokultur di Lampung, yang memiliki persentase penutupan, berturut-turut sebesar 56 dan 45 %.

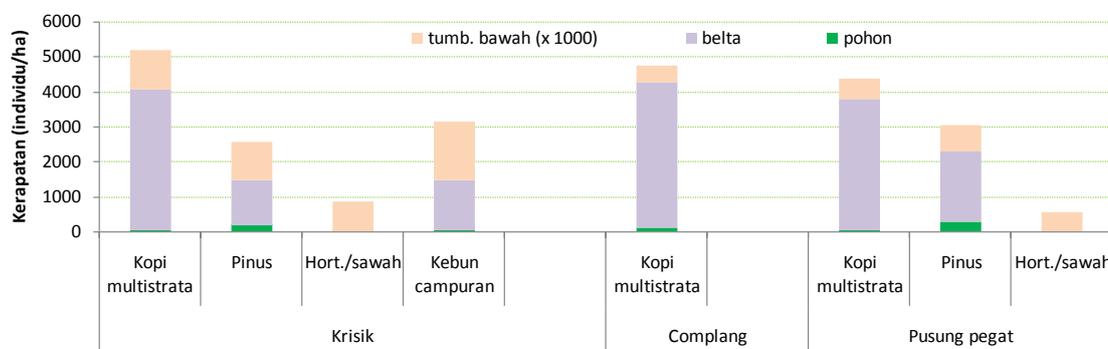


Gambar 50. Persentase penutupan kanopi pada SPL di tiga daerah resapan mata air

Di daerah resapan mata air Krisik, SPL Pinus memiliki kerapatan pohon tertinggi sebesar 183 individu.ha⁻¹. Diikuti kerapatan pohon pada SPL Kopi multistrata dan Kebun campuran sebesar 38 dan 28 individu.ha⁻¹. Akan tetapi, kerapatan belta tertinggi dimiliki oleh SPL Kopi multistrata sebesar 4.031 individu.ha⁻¹, diikuti SPL Kebun campuran dan Pinus, masing-masing 1.450 dan 1.275 individu.ha⁻¹. Kerapatan pohon dan belta pada SPL Kopi multistrata di mata air Complang sebesar 93 dan 4.165 individu.ha⁻¹. Sedangkan di mata air Pusung Pegat, SPL Pinus juga memiliki kerapatan pohon (266 individu.ha⁻¹) lebih tinggi dibandingkan SPL Kopi multistrata (29 individu.ha⁻¹). Akan tetapi untuk

kerapatan belta pada SPL Kopi multistrata memiliki kerapatan lebih tinggi (3.767 individu.ha⁻¹) dibandingkan kerapatan pada SPL Pinus (2.013 individu.ha⁻¹).

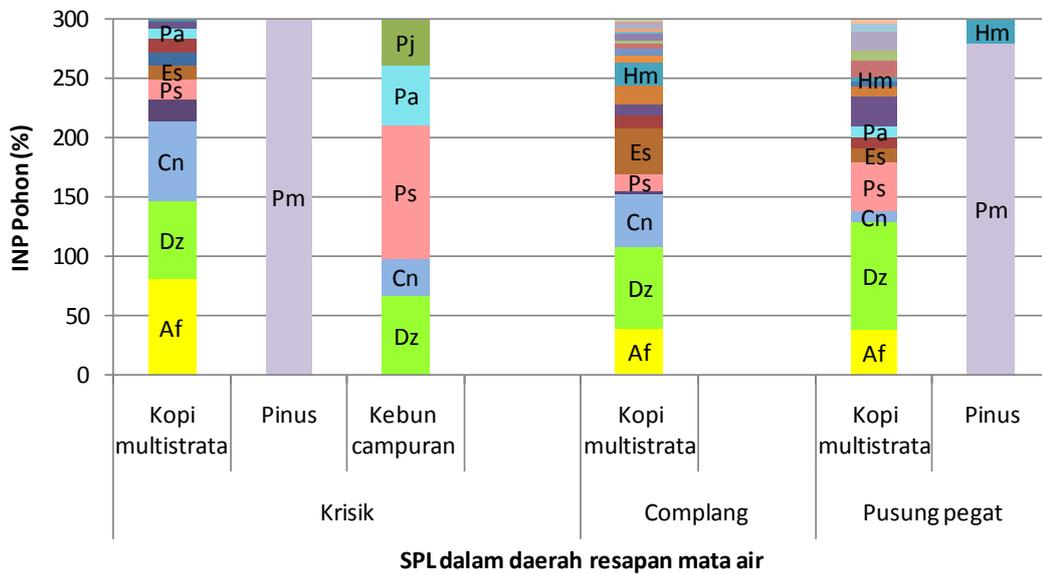
Pada kelompok tumbuhan bawah, SPL Kebun campuran memiliki kerapatan tumbuhan bawah tertinggi (1.670.000 individu.ha⁻¹) dibandingkan SPL lainnya di mata air Krisik. Hal ini karena SPL ini memiliki kerapatan tumbuhan pohon dan belta paling rendah, sehingga lahan lebih terbuka. Di daerah resapan mata air Complang, kerapatan tumbuhan bawah hanya sebesar 475.000 individu.ha⁻¹. Sedangkan di daerah resapan mata air Pusung Pegat, SPL Pinus memiliki kerapatan tumbuhan bawah tertinggi (760.000 individu.ha⁻¹). SPL Kopi multistrata memiliki kerapatan sekitar 555.000 individu.ha⁻¹.



Gambar 51. Kerapatan pohon, belta dan tumbuhan bawah di daerah resapan tiga mata air

Dominansi jenis tumbuhan diperoleh dari hasil perhitungan Indeks Nilai Penting (INP) masing-masing jenis. Jenis dominan adalah jenis yang memiliki INP tinggi. Dominasi jenis menunjukkan tingkat kehadiran dan penguasaan suatu jenis dalam ekosistem. Berdasarkan profil INP jenis-jenis komunitas tumbuhan, masing-masing SPL pada daerah resapan ketiga mata air menunjukkan dominansi jenis pohon dan belta yang berbeda-beda (Gambar 52). Pada SPL Kopi multistrata di daerah resapan mata air Krisik, jenis pohon sengon laut (*Albizia falcataria*) memiliki INP tertinggi (50,56%). Sedangkan pada SPL Kopi multistrata di Complang dan Pusung Pegat, durian (*Durio zibethinus*) memiliki INP pohon tertinggi, berturut-turut bernilai 35,46 dan 48,71%. Jenis-jenis pohon lain dengan kerapatan tinggi pada SPL ini di kedua daerah resapan mata air diantaranya sengon laut (*A. falcataria*), kelapa (*Cocos nucifera*), petai (*Parkia speciosa*) dan dadap (*Erythrina subumarn*). Pinus (*Pinus merkusii*) merupakan jenis pohon

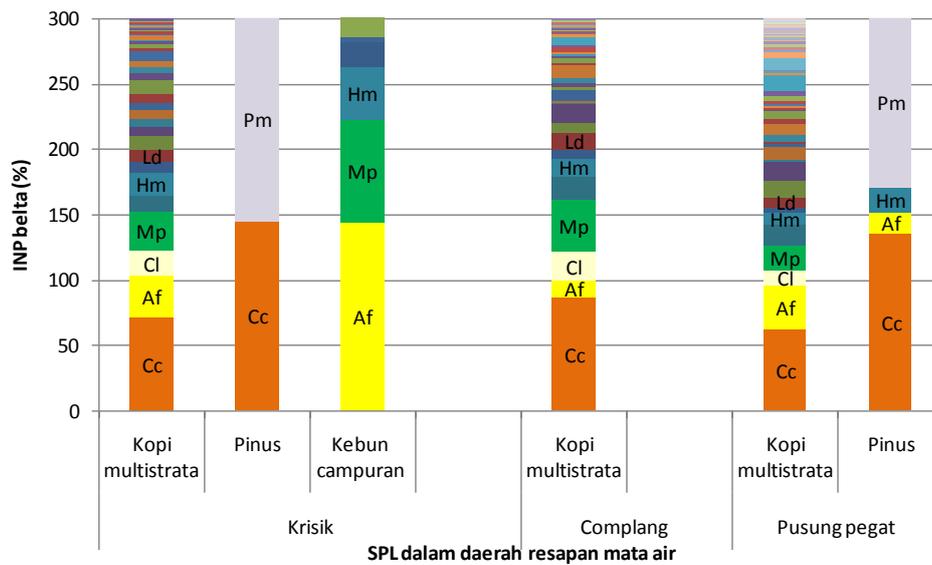
dengan INP tertinggi pada SPL Pinus di mata air Krisik dan Pusung Pegat, karena jenis ini ditanam sebagai hutan produksi yang homogen. Pada SPL Kebun campuran di mata air Krisik, jenis pohon yang memiliki INP tertinggi adalah petai (*P. speciosa*).



Gambar 52. Profil INP jenis pohon pada SPL-SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Keterangan: Af: *Albizia falcataria*; Dz: *Durio zibethinus*; Cn: *Cocos nucifera*; Ps: *Parkia speciosa*; Pm: *Pinus merkusii*; Pa: *Persea americana*; Pj: *Pithecellobium jiringa*; Es: *Erythrina subumarn*; Hm: *Hibiscus macrophyllus*.

Untuk jenis belta, kopi robusta (*Coffea canephora* var. *robusta*) mendominasi pada semua SPL di ketiga daerah resapan mata air, kecuali pada SPL Kebun campuran (Krisik). Jenis belta lainnya yang mempunyai INP tinggi adalah pisang (*Musa paradisiaca*), kopi asisa (*Coffea liberica*), langsep (*Lansium domesticum*) dan waru gunung (*Hibiscus macrophyllus*). Pada SPL Pinus (Krisik dan Pusung Pegat), jenis beltanya didominasi pohon pinus (*P. merkusii*) yang masih muda dan kopi robusta. Sedangkan pada SPL Kebun campuran, jenis belta didominasi oleh sengon laut (*A. falcataria*). SPL ini merupakan SPL yang sedang mengalami perubahan dari kebun campuran menjadi kebun sengon (Gambar 53).

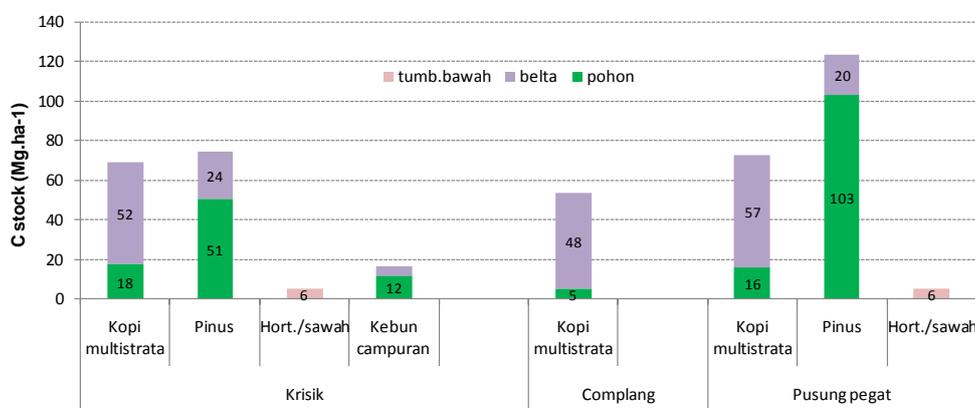


Gambar 53. Profil INP jenis belta pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Keterangan: Cc: *Coffea canephora* var. *robusta*; Af: *Albizia falcataria*; Cl: *Coffea liberica*; Mp: *Musa paradisiaca*; Pm: *Pinus merkusii*; Hm: *Hibiscus macrophyllus*; Ld: *Lansium domesticum*

INP tumbuhan bawah hanya ditentukan oleh kerapatan relatif dan frekuensi relatifnya. Profil INP jenis tumbuhan bawah menunjukkan bahwa pada jenis-jenis tumbuhan bawah tidak terdapat dominansi suatu jenis tumbuhan pada semua SPL di daerah resapan ketiga mata air (Gambar 54). SPL Kopi multistrata di daerah resapan mata air Krisik ditemukan jenis rumput *Synedrella nodiflora*, *Panicum sp.*, dan *Oxalis corniculata*, dengan INP tinggi (20-25%). Sedangkan rumput gajah (*Penisetum purpureum*) mempunyai INP tertinggi di SPL Pinus (43%). Pada SPL Hortikultura/ sawah, jenis yang memiliki INP tinggi adalah wedusan (*Ageratum conyzoides*), *Adenostema lavenia* dan taisok (*Eryngium foetidum*). Sedangkan SPL Kebun campuran memiliki jenis rumput *Axonophus compressus* dengan INP tertinggi, yaitu 53,98%. Di daerah resapan mata air Complang, jenis rumput *Oplismenus burmanii* memiliki INP tertinggi (44,48%), diikuti *S. nodiflora* (29,52%). SPL Kopi multistrata di mata air Pusung Pegat banyak ditanami rumput gajah, jenis liar yang banyak ditemukan adalah *S. nodiflora* dan *Achyranthes aspera*. Demikian juga SPL Pinus di kawasan ini didominasi rumput gajah (*P. purpureum*). SPL Hortikultura/ sawah banyak ditumbuhi rempi (*Oxalis barrelieri*), *Artemisia vulgaris* dan *Centella asiatica*.

bawah terhadap cadangan C suatu lahan diketahui sangat kecil, sehingga bisa diabaikan.



Gambar 55. Profil *C stock* pada SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Hasil perhitungan *C stock* pada SPL-SPL di daerah resapan ketiga mata air tersebut tidak jauh berbeda dengan rata-rata *C stock* di beberapa SPL yang sama di Kecamatan Ngantang. Hasil penelitian terdahulu di Kec. Ngantang menyebutkan bahwa *C stock* yang berasal dari biomassa di atas tanah (pohon dan belta) memberikan kontribusi lebih rendah dibandingkan *C stock* di dalam tanah.

C stock di bawah tanah mampu memberikan kontribusi sebesar 40-70% dari total *C stock* di suatu SPL. Dari hasil perhitungan cadangan karbon (*C stock*) pada kawasan lain di Kec. Ngantang diketahui total cadangan karbon pada SPL Pinus (berumur 25-40 tahun) berkisar antara 159 hingga 198 Mg.ha^{-1} , dengan total cadangan karbon dari biomassa pohon dan belta sekitar 50 - 80 Mg.ha^{-1} dan sekitar 100 Mg.ha^{-1} C berasal dari biomassa akar, nekromassa dan C tanah. Sedangkan total cadangan karbon pada agroforestri kopi di Ngantang berkisar antara 99 hingga 123 Mg.ha^{-1} , dengan rincian sebesar ± 40 Mg.ha^{-1} berasal dari biomassa pohon dan belta dan ± 85 Mg.ha^{-1} cadangan karbon tersebut berasal dari cadangan karbon di akar dan tanah (Hairiah dan Rahayu, 2010). Besarnya cadangan karbon di SPL Pinus dan SPL Kopi multistrata di mata air Krisik dan Pusung Pegat tersebut lebih besar dibandingkan cadangan karbon pada hutan terdegradasi di Ngantang (40 Mg.ha^{-1}). Akan tetapi cadangan karbon tersebut masih jauh lebih kecil ($\pm 40-50$ %) dari hutan Tahura R. Soerjo, Kabupaten Malang (± 160 Mg.ha^{-1}). Pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran cadangan

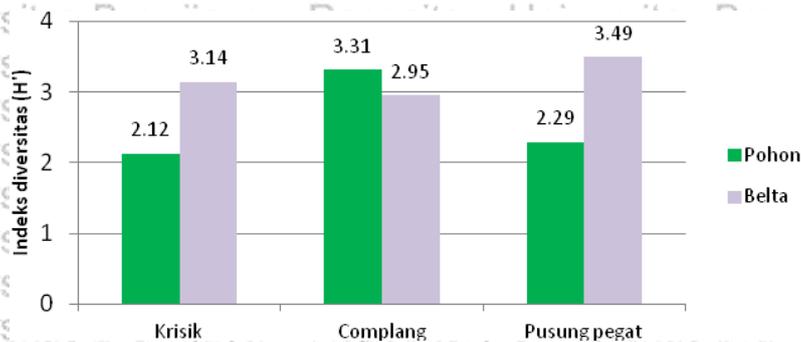
karbon di SPL Hortikultura/ sawah. Berdasarkan hasil penelitian Hairiah dan Rahayu (2010) disebutkan cadangan karbon yang berasal dari biomasa sayuran sangat kecil ($\pm 1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Sedangkan cadangan karbon yang dihasilkan jika SPL ini ditanami rumput gajah sebesar $\pm 10 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Pada umumnya, SPL Kopi multistrata memiliki kualitas komunitas tumbuhan terbaik dibandingkan SPL-SPL lainnya di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat, baik berdasarkan keragaman jenis, struktur dan komposisinya (stratifikasi, penutupan kanopi, kerapatan belta dan tumbuhan bawah, serta INP). Akan tetapi untuk kerapatan pohon dan *C-stock* yang dimiliki oleh SPL ini lebih rendah dibandingkan dengan SPL Pinus.

5.3.5.2. Karakteristik vegetasi di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

a. Diversitas Jenis Tumbuhan

Daerah resapan mata air Complang memiliki Indeks diversitas Shannon-Wiener (H') pohon tertinggi, yaitu sebesar 3,31 (Gambar 56.). Sedangkan untuk belta, daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki H' tertinggi hingga 3,49. Indeks diversitas pohon dan belta di ketiga daerah resapan mata air tergolong sedang, sehingga kondisi ekosistemnya cukup stabil.

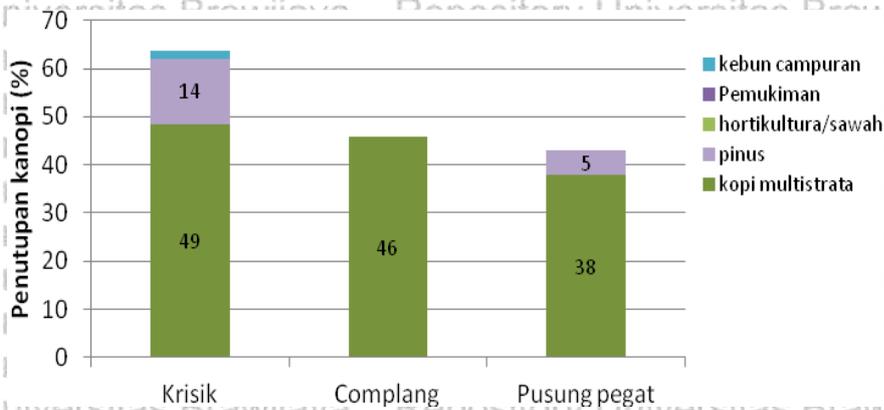


Gambar 56. Indeks diversitas pohon dan belta di tiga daerah resapan mata air

b. Penutupan kanopi

Daerah resapan mata air Krisik memiliki penutupan kanopi paling rapat, yaitu sebesar 63,80 %. Daerah resapan mata air Complang memiliki penutupan kanopi hingga 45,72%. Sedangkan daerah resapan mata air Pusung Pegat

memiliki penutupan kanopi terendah, yaitu sebesar 42,89%. Dari Gambar 57 terlihat bahwa SPL Kopi multistrata memberikan kontribusi terbesar dalam persentase penutupan kanopi di tiga daerah resapan mata air, diikuti dengan SPL Pinus.

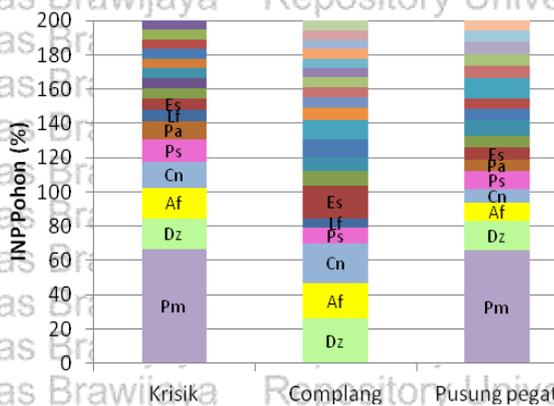


Gambar 57. Penutupan kanopi per SPL di tiga daerah resapan mata air

c. Dominansi Pohon dan Belta

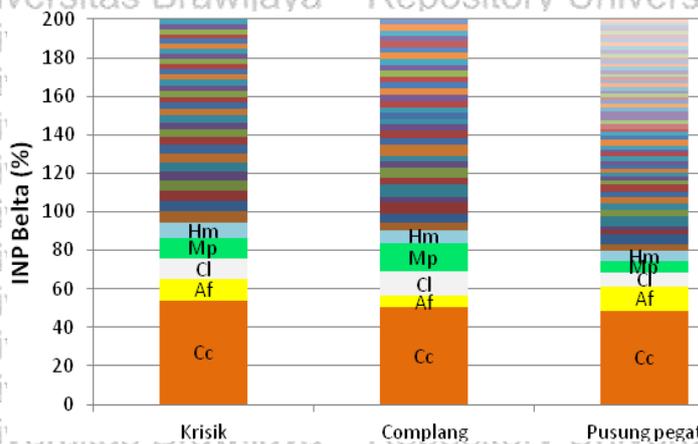
Berdasarkan profil INP jenis-jenis komunitas vegetasi, masing-masing daerah resapan ketiga mata air menunjukkan dominansi jenis pohon dan belta yang berbeda-beda (Gambar 58). Pinus (*P. merkusii*) mendominasi jenis pohon di daerah resapan mata air Krisik dan Pusung Pegat dengan INP masing-masing 66,80% dan 65,80%. Kemudian diikuti dengan durian (*D. zibethinus*) dan sengon laut (*A. falcataria*) yang juga mendominasi kedua daerah resapan mata air tersebut. Sedangkan daerah mata air Complang didominasi oleh durian (*D. zibethinus*), INP nya mencapai 25,97%. Jenis lain yang mendominasi daerah ini adalah kelapa (*C. nucifera*), sengon laut (*A. falcataria*) dan petai (*P. spesiosa*) dengan INP masing-masing sebesar 23,28 %, 20,59% dan 9,30%.

Sedangkan untuk jenis belta, terlihat kopi robusta (*C. canephora* var. robusta) mendominasi ketiga daerah resapan mata air dengan INP hampir sama di ketiga mata air, yaitu Krisik (53,91 %), Complang (50,44 %) dan Pusung Pegat (48,71%) (Gambar 59). Jenis belta lainnya yang mendominasi adalah sengon laut (*A. falcataria*), kopi asisa (*C. liberica*) dan pisang (*M. paradisiaca*).



Gambar 58. Profil INP jenis pohon di tiga daerah resapan mata air

Keterangan: Pm: *Pinus merkusii*; Dz: *Durio zibethinus*; Af: *Albizia falcataria*; Cn: *Cocos nucifera*; Ps: *Parkia speciosa*; Pa: *Persea americana*; Es: *Erythrina subumbrata*; Sm: *Swietenia macrophylla*



Gambar 59. Profil INP jenis belta di tiga daerah resapan mata air

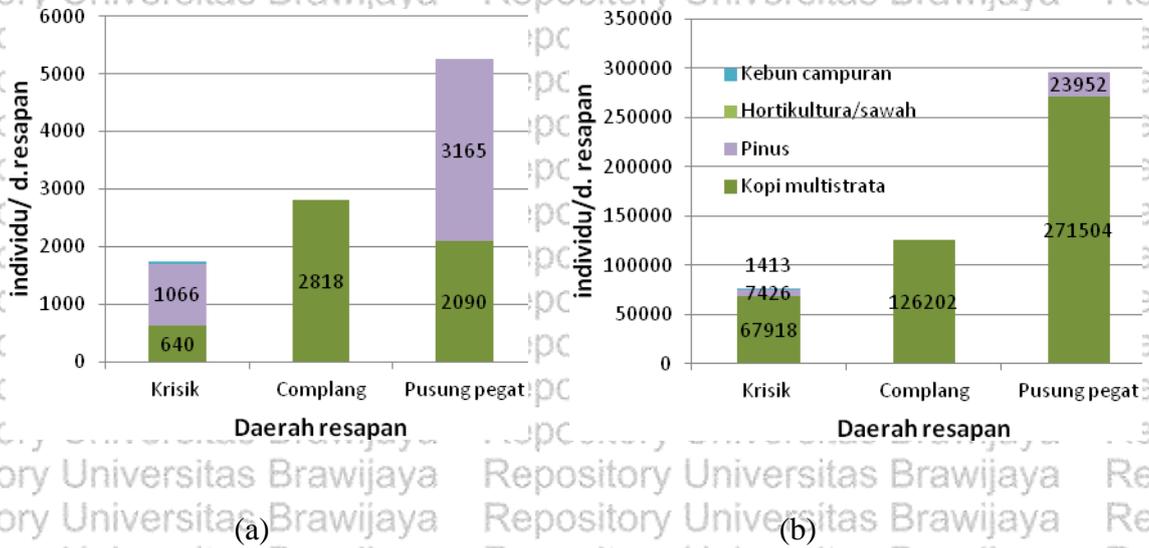
Keterangan: Cc: *Coffea canephora var. robusta*; Af: *Albizia falcataria*; Cl: *Coffea liberica*; Mp: *Musa paradisiaca*; Hm: *Hibiscus macrophyllus*.

d. Kerapatan pohon, belta dan tumbuhan bawah

Kerapatan pohon dan belta tertinggi dimiliki oleh daerah resapan mata air Pusung Pegat, dimana kerapatannya berturut-turut mencapai 5255 pohon dan 295.456 belta. Daerah resapan mata air Complang memiliki 2.818 pohon dan 126.202 belta. Sedangkan daerah resapan mata air Krisik memiliki kerapatan pohon dan belta terendah, yaitu 1.733 pohon dan 76.757 belta. Pada daerah resapan mata air Pusung Pegat, SPL Pinus memberikan kontribusi kerapatan pohon terbanyak (60%) dibandingkan SPL lainnya. SPL ini juga memberikan

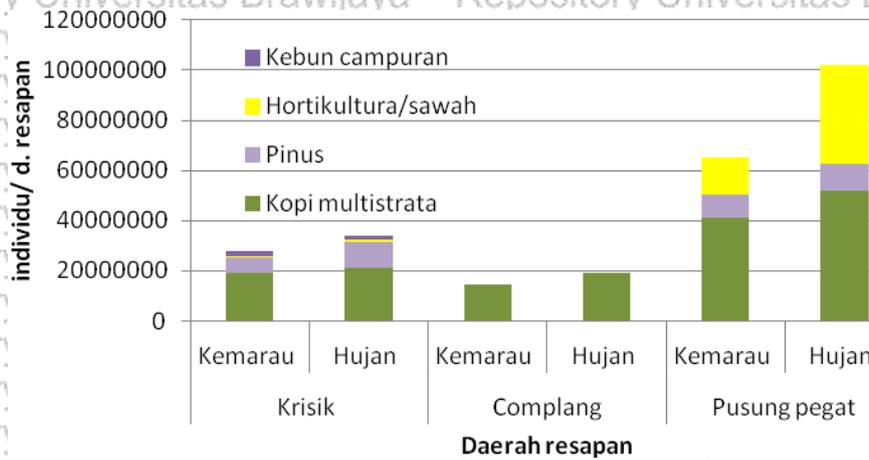


kontribusi terbanyak (61%) pada kerapatan pohon di daerah resapan mata air Krisik. Sedangkan SPL Kopi multistrata memberikan kontribusi kerapatan belta terbanyak di ketiga daerah resapan mata air (Gambar 60).



Gambar 60. Kerapatan vegetasi di ketiga daerah resapan mata air

Keterangan: (a) Pohon
(b) Belta



Gambar 61. Kerapatan tumbuhan bawah di ketiga daerah resapan mata air

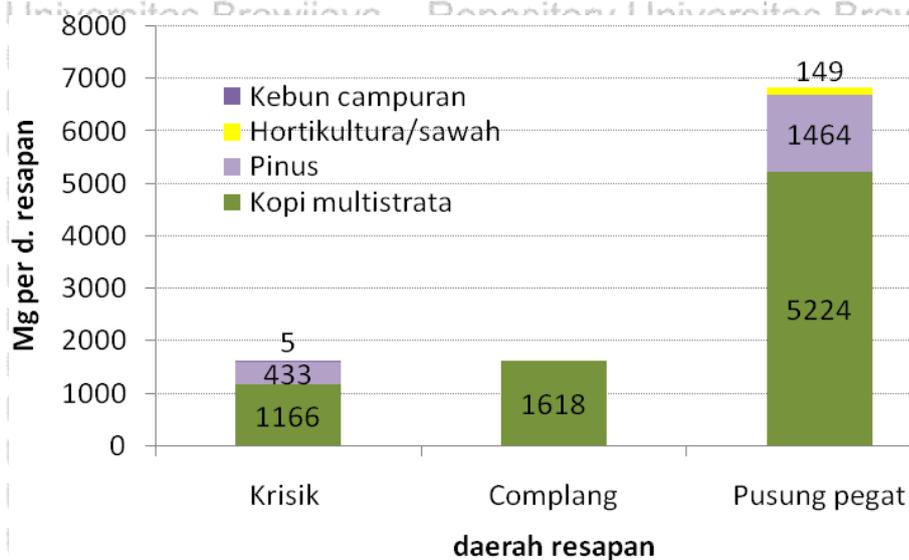
Karakterisasi kerapatan tumbuhan bawah dilakukan dalam dua musim, yaitu musim kemarau dan penghujan. Daerah resapan mata air Pusung Pegat memiliki kerapatan tertinggi, baik pada musim kemarau (65.258.578 individu)

dan penghujan (101.975.732 individu). Diikuti kemudian dengan kerapatan tumbuhan bawah daerah resapan mata air Krisik dan Complang. SPL Kopi multistrata memberikan kontribusi terbanyak terhadap kerapatan tumbuhan bawah di ketiga daerah resapan mata air (Gambar 61).

e. Indeks Kualitas Biodiversitas dan Cadangan Karbon (*C stock*)

Indeks Kualitas Biodiversitas dan *C stock* merupakan indikator layanan ekosistem (*ecosystem services*) yang dihasilkan oleh suatu SPL. Indeks Kualitas Biodiversitas digunakan untuk menyatakan kualitas biodiversitas masing-masing daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat secara lanskap, dengan memberikan indeks pada tiap-tiap SPL kemudian menjumlahkannya sesuai dengan proposinya. SPL Kopi multistrata dan Kebun campuran diberi indeks 0,6, SPL Pinus diberi indeks 0,3, SPL Hortikultura/ sawah dan pemukiman diberi indeks 0 (Pagiola *et al.*, 2007). Hasil perhitungan indeks tersebut menunjukkan daerah resapan mata air Krisik memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas tertinggi, yaitu sebesar 0,51. Diikuti kemudian oleh daerah resapan mata air Complang dan Pusung Pegat, berturut-turut memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas sebesar 0,47 dan 0,36. Hal ini mengindikasikan kualitas biodiversitas yang terdapat di daerah resapan mata Krisik lebih tinggi dari biodiversitas yang ada di daerah resapan mata air Complang dan Pusung Pegat. Tingginya Indeks Kualitas Biodiversitas di daerah resapan mata air Krisik diikuti dengan tingginya penutupan kanopi. Krisik memiliki persentase penutupan kanopi tertinggi dibandingkan dua daerah resapan mata air lainnya, karena sebagian besar daerah ini merupakan SPL-SPL bervegetasi (SPL Kopi multistrata, SPL Kebun campuran dan SPL Pinus) mencapai 97% dan hanya sebagian kecil berupa SPL Hortikultura/ sawah.

Sedangkan untuk *C stock*, daerah resapan mata air Pusung Pegat menghasilkan *C stock* tertinggi sebesar 6837 Mg per daerah resapan. Daerah resapan mata air Krisik dan Complang menghasilkan *C stock* hampir sama, masing-masing 1620 dan 1618 Mg per daerah resapan. SPL Kopi multistrata memberikan kontribusi terbesar dalam menghasilkan *C-stock* (Gambar 62).



Gambar 62. Profil C-stock dari SPL-SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

5.3.6. Karakteristik Hidrologi

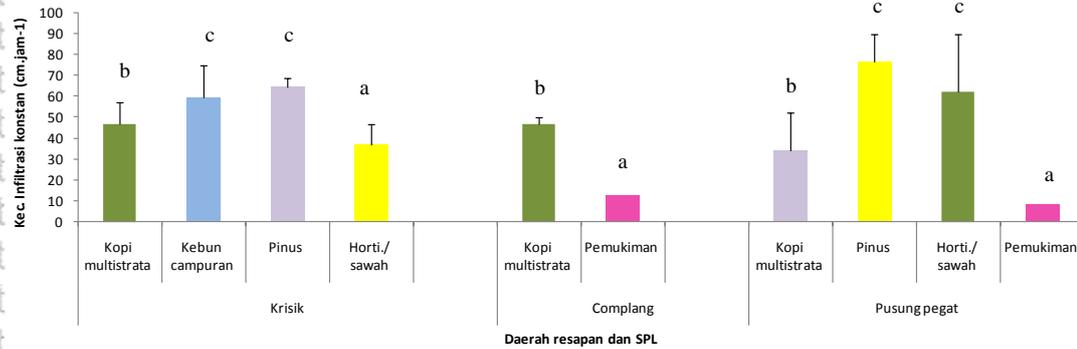
5.3.6.1. Kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah antar SPL-SPL di tiap daerah resapan mata air

Empat jenis SPL di daerah mata air Krisik memiliki kecepatan infiltrasi yang berbeda nyata ($P=0,048$). SPL Pinus dan Kebun campuran memiliki kecepatan infiltrasi tertinggi, berturut-turut sebesar $64,13$ dan $59,68 \text{ cm.jam}^{-1}$, kemudian diikuti SPL Kopi multistrata, yang memiliki kecepatan infiltrasi sebesar $46,91 \text{ cm.jam}^{-1}$. SPL Hortikultura/ sawah memiliki kecepatan infiltrasi terendah sebesar $36,5 \text{ cm.jam}^{-1}$ (Gambar 63). Kecepatan infiltrasi keempat SPL yang terdapat di daerah resapan mata air Krisik tergolong sangat cepat ($>25 \text{ cm.jam}^{-1}$) (Kohnke, 1968 dalam Lee, 1990).

Kecepatan infiltrasi di daerah resapan mata air Complang menunjukkan perbedaan nyata antara SPL Kopi multistrata ($46,90 \text{ cm.detik}^{-1}$) dan Pemukiman ($12,23 \text{ cm.detik}^{-1}$) dengan kategori sangat cepat dan cepat (Kohnke, 1968 dalam Lee, 1990). Sedangkan kecepatan infiltrasi di daerah resapan mata air Pusung Pegat berbeda nyata pada empat jenis SPL yang ada ($P < 0,1$). SPL Pinus memiliki kecepatan infiltrasi tertinggi ($76,59 \text{ cm.jam}^{-1}$), sama dengan kecepatan



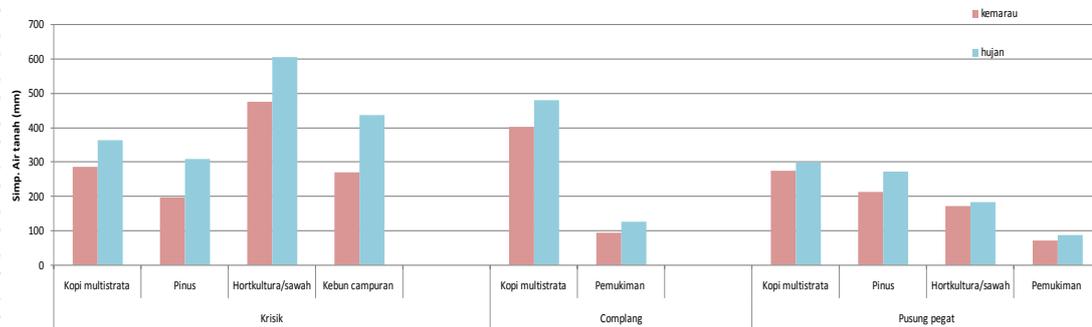
infiltrasi pada SPL Hortikultura/sawah ($62,5 \text{ cm.jam}^{-1}$). Kopi multistrata memiliki kecepatan infiltrasi $34,2 \text{ cm.jam}^{-1}$ dan pemukiman sebesar $7,98 \text{ cm.jam}^{-1}$. Kecepatan infiltrasi pada tiga SPL di mata air Pusung Pegat tergolong sangat cepat, kecuali kecepatan infiltrasi pada pemukiman tergolong sedang (Gambar 63).



Gambar 63. Kecepatan infiltrasi pada berbagai SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata

Simpanan air tanah pada berbagai SPL di mata air Krisik menunjukkan SPL Hortikultura memiliki simpanan air tanah paling tinggi, baik di musim kemarau dan musim hujan. Di daerah resapan mata air Complang, Kopi multistrata memiliki simpanan air tanah lebih tinggi dibandingkan pemukiman, baik di musim kemarau dan musim hujan. Sedangkan di Pusung Pegat, Kopi multistrata memiliki simpanan air tanah tertinggi di musim kemarau dan hujan (Gambar 64).

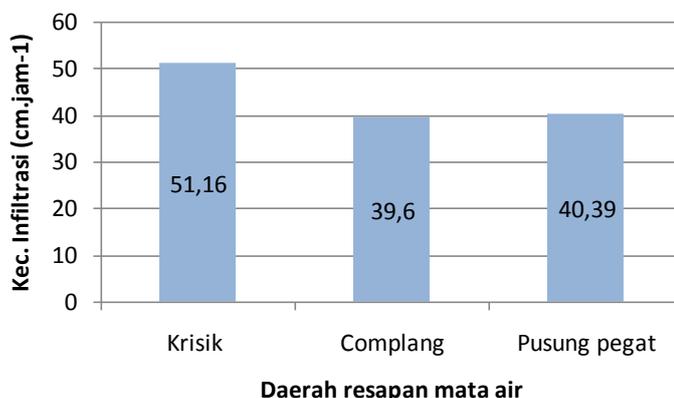


Gambar 64. Simpanan air tanah pada berbagai SPL di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

5.3.6.2. Kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

Daerah resapan mata air Krisik memiliki kecepatan infiltrasi tertinggi dibandingkan dua daerah resapan mata air lainnya (Gambar 65). Pusung Pegat dan Complang memiliki kecepatan infiltrasi yang hampir sama. Kecepatan infiltrasi ketiga daerah resapan mata air ini tergolong sangat cepat ($>25 \text{ cm.jam}^{-1}$) (Kohnke, 1968 dalam Lee, 1990). Kecepatan infiltrasi di mata air Krisik lebih besar dari kecepatan infiltrasi pada hutan terganggu di Kecamatan Ngantang sebesar $50,2 \text{ cm.jam}^{-1}$ (Saputra, 2008).

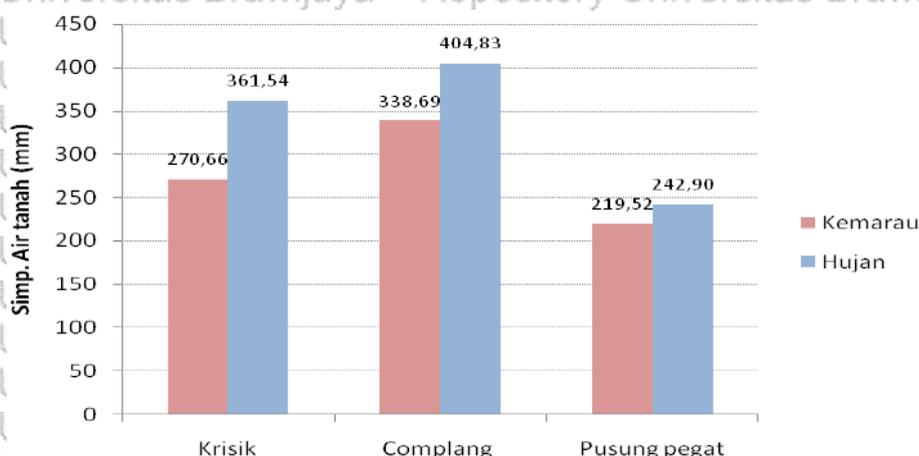
Tingginya kecepatan infiltrasi di daerah resapan ketiga mata air dapat disebabkan tekstur tanahnya memiliki kandungan pasir lebih tinggi dibandingkan kandungan debu dan liat. Pengaruh tekstur tanah terhadap infiltrasi muncul pada tanah yang memiliki ukuran partikel berbeda. Tanah bertekstur kasar (kandungan pasir lebih banyak) memiliki kemampuan meneruskan air lebih tinggi dibandingkan dengan tanah bertekstur halus (Soepardi, 1983). Sedangkan tingginya kecepatan infiltrasi di mata air Krisik didukung oleh lebih rendahnya BI tanah dan lebih tingginya porositas tanah dibandingkan Pusung Pegat dan Complang.



Gambar 65. Kecepatan infiltrasi di tiga daerah resapan mata air.

Daerah resapan mata air Complang memiliki simpanan air tanah tertinggi di musim kemarau dan penghujan (Gambar 66). Akan tetapi, jika dilihat dari selisih antara simpanan air tanah di musim hujan dan kemarau, maka terlihat mata air Krisik memiliki selisih simpanan air tanah tertinggi, yaitu $90,88 \text{ mm}$.

Sedangkan selisih simpanan air tanah di mata air Complang mencapai 66,14 mm dan di mata air Pusung Pegat mencapai 23,37 mm.



Gambar 66. Simpanan air tanah pada musim kemarau dan hujan di tiga daerah resapan mata air

5.4. KESIMPULAN

Hasil karakterisasi biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menunjukkan:

1. Mata air Krisik memiliki luas daerah resapan tersempit (24,48 ha) dan kelerengan tercuram (18%) dibandingkan dengan mata air Complang (38,37 ha dan 14%) dan Pusung Pegat (128,56 ha dan 12%).
2. Mata air Krisik memiliki akuifer paling dangkal (0,93 m) dan paling tebal (12,59 m) dibandingkan dengan akuifer mata air Complang dan Pusung Pegat.
3. Umumnya, biofisik tanah daerah resapan mata air Krisik hampir sama dengan mata air Pusung Pegat dan lebih baik dari Complang. Meskipun C-organik dan kemantapan agregatnya lebih rendah dari Pusung Pegat, namun tanah di mata air Krisik memiliki porositas lebih tinggi dan tanah lebih ringan (BI tanah lebih rendah). KHJ di daerah resapan mata air Krisik dan Pusung Pegat tergolong sangat cepat.
4. Mata air Krisik memiliki penutupan kanopi tertinggi dibandingkan Pusung Pegat dan Complang. Mata air Krisik memiliki kerapatan pohon, belta dan tumbuhan bawah terendah dibandingkan dua mata air lainnya. Jenis pohon yang mendominasi daerah resapan mata air



Krisik dan Pusung Pegat sama yaitu Pinus (*P. merkusii*), durian (*D. zibethinus*) dan sengon laut (*A. falcataria*). Sedangkan mata air Complang didominasi oleh durian (*D. zibethinus*), sengon laut (*A. falcataria*) dan kelapa (*C. nucifera*). Jenis belta yang mendominasi ketiga daerah resapan mata air sama, yaitu kopi robusta (*C. canephora* var. robusta), sengon laut (*A. falcataria*), kopi asisa (*C. liberica*) dan pisang (*M. paradisiaca*). Indeks Kualitas Biodiversitas di daerah resapan mata air Krisik tertinggi dibandingkan mata air Complang dan Pusung pegat, namun *C stock* yang dihasilkan paling rendah.

5. Mata air Krisik memiliki kecepatan infiltrasi tertinggi ($51,16 \text{ cm.jam}^{-1}$) dan selisih simpanan air tanah tertinggi (90,88 mm) dibandingkan mata air Pusung Pegat dan Complang.

Repository Universitas Brawijaya

REPOSITORY.UB.AC.ID

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

VI. EKSPLORASI HUBUNGAN KARAKTERISTIK LAHAN, BIOGEOHIDROFISIK DAN VEGETASI DI DAERAH RESAPAN MATA AIR DENGAN ANALISIS MULTIVARIATE (PARTIAL LEAST SQUARE/ PLS)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk eksplorasi hubungan antara karakteristik lahan, geofisik, biofisik, vegetasi dan hidrologi daerah resapan mata air dengan debit mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat di Kecamatan Ngantang. Penelitian eksploratif deskriptif dilakukan dengan memperoleh data dan menguji rancangan. Data terdiri dari debit, curah hujan, luas daerah resapan dan kelerengan, kedalaman dan ketebalan akuifer, biofisik tanah (C-organik, BI, tekstur, porositas, kemantapan agregat dan KHJ), karakteristik vegetasi (Indeks Kualitas Biodiversitas, penutupan kanopi, kerapatan dan *C stock*), kecepatan infiltrasi dan simpanan air tanah. Model hubungan antara debit, curah hujan, karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi daerah resapan mata air dianalisis dengan *opensource software Smart PLS*. Data disusun berpasangan sebanyak 72 data dalam satu periode pengamatan. Model PLS menunjukkan bahwa debit mata air secara langsung dipengaruhi oleh karakteristik vegetasi, geofisik, biofisik tanah dan hidrologi. Sedangkan Curah hujan berpengaruh tidak langsung ke debit mata air. Model PLS ini memiliki nilai *predictive relevance Q²* sebesar 100%, sehingga model layak digunakan dan memiliki nilai prediktif yang sangat relevan. Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) merupakan variabel yang berpengaruh negatif paling nyata terhadap debit mata air. Semakin tinggi kerapatan belta, maka semakin rendah debit mata airnya

Kata kunci: mata air, model, debit, biogeohidrofisik, vegetasi

6.1. PENDAHULUAN

Mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat yang terletak di Kecamatan Ngantang merupakan jenis mata air kontak, berdebit kecil ($\pm 1 \text{ l.detik}^{-1}$) dan berasal dari akuifer dangkal. Ketiga mata air ini bisa dibedakan berdasarkan besarnya debit dan pola aliran debit airnya. Mata air Krisik memiliki rata-rata debit tertinggi ($0,46 \text{ l.detik}^{-1}$) per bulannya, diikuti dengan debit mata air Complang ($0,3 \text{ l.detik}^{-1}$) dan Pusung Pegat ($0,11 \text{ l.detik}^{-1}$) per bulan. Mata air Krisik memiliki pola aliran mata air yang mengeluarkan air sepanjang tahun, meskipun debitnya mengalami penurunan di musim kemarau. Sementara itu, mata air Complang dan Pusung Pegat mengalami pengeringan selama 1 dan 4 bulan.

Jumlah dan pola debit mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat diduga dipengaruhi oleh curah hujan dan karakteristik daerah resapannya (*recharge area*).

Hal ini sesuai dengan Negi and Joshi (2004) yang menyatakan debit mata air yang berasal akuifer dangkal dipengaruhi oleh curah hujan dan karakteristik daerah resapannya. Dari hasil kajian karakteristik lahan, diketahui mata air Krisik



memiliki luas daerah resapan tersempit (24,48 ha) dan Pusung Pegat memiliki daerah resapan paling luas (128,56 ha). Ketiga daerah resapan memiliki kelerengan hampir sama, yaitu dari landai hingga agak curam. Daerah resapan mata air Krisik memiliki Berat Isi tanah rendah, porositas tinggi dan tekstur tanah yang sebagian besar lempung berpasir, serta Konduktivitas Hidrolik Jenuh (KHJ) tanah sangat cepat dapat menyebabkan resapan air tanah lebih banyak. Karakteristik Biofisik tanah tinggi juga dimiliki daerah resapan mata air Pusung Pegat, yang memiliki C-organik tinggi, kemantapan agregat tinggi dan KHJ sangat cepat. Dengan demikian, daerah resapan mata air Complang memiliki karakteristik biofisik tanah terendah.

Berdasarkan karakteristik vegetasinya, mata air Krisik memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas dan persentase penutupan kanopi tertinggi. Akan tetapi, kerapatan pohon, belta dan tumbuhan bawah di daerah resapan mata air ini lebih rendah dari mata air Complang dan Pusung Pegat. Jenis pohon yang mendominasi daerah resapan mata air Krisik sama dengan mata air Pusung Pegat, yaitu pinus (*P. merkusii*), durian (*D. zibethinus*) dan sengon laut (*A. falcataria*). Sedangkan durian (*D. zibethinus*) mendominasi daerah resapan mata air Complang. Kopi robusta (*Coffea canephora* var. *robusta*) mendominasi jenis belta di ketiga daerah resapan mata air. Tingginya Indeks Kualitas Biodiversitas dan penutupan kanopi di mata air Krisik berkaitan dengan tingginya kecepatan infiltrasi di daerah ini.

Terjadinya penurunan debit di mata air Krisik dan pengeringan debit di mata air Complang dan Pusung Pegat memerlukan kajian terhadap variabel-variabel yang mempengaruhi debit mata air tersebut. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk eksplorasi hubungan antara karakteristik lahan, geofisik, biofisik, vegetasi dan hidrologi daerah resapan mata air dengan debit mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat di Kecamatan Ngantang. Setelah hubungan antara variabel-variabel tersebut diketahui, dilanjutkan dengan menentukan variabel mana yang paling berpengaruh pada debit mata air.

6.2. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan merupakan data kuantitatif debit mata air, curah hujan, karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi di tiga daerah resapan mata air, yaitu mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat. Pada setiap mata air diamati:

1. Variabel Debit (D) terdiri dari indikator D (Debit ($l \cdot \text{detik}^{-1}$ atau $\text{dm}^3 \cdot \text{detik}^{-1}$))
2. Variabel Curah hujan terdiri dari indikator CH (Curah hujan (mm))
3. Variabel Geofisik (G) terdiri dari dua indikator, yaitu G.KD (kedalaman akuifer (m)) dan G.KL (ketebalan akuifer (m)).
4. Variabel Lahan (L) terdiri dari dua indikator L.LS (luas daerah resapan (ha)) dan L.KL (kelerengan (%)).
5. Variabel Biofisik tanah terdiri enam indikator yaitu B.CO (C-Organik (%)), B.BI (Berat Isi ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)), B.TP (Tekstur Pasir (%)), B.TD (Tekstur Debu (%)), B.TL (Tekstur Liat (%)), B.PR (Porositas (%)), B.KA (Kemantapan Agregat (mm)) dan B.KHJ (KHJ ($\text{cm} \cdot \text{jam}^{-1}$)).
6. Variabel karakteristik Vegetasi terdiri dari tujuh indikator, yaitu IKB (Indeks Kualitas Biodiversitas), K.PK (Penutupan Kanopi (%)), K.KR (kerapatan) yang terdiri dari K.KRP (Kerapatan Pohon (individu per luas daerah resapan)), K.KRB (Kerapatan Belta (individu per luas daerah resapan)), K.KRTB (Kerapatan Tumbuhan Bawah (individu per luas daerah resapan)) dan K.CS (*C Stock* (Mg per luas daerah resapan)).
7. Variabel hidrologi mata air terdiri dua indikator, yaitu H.KI (Kecepatan Infiltrasi ($\text{cm} \cdot \text{jam}^{-1}$)) dan H.SAT (Simpanan air tanah (mm)).

Pengumpulan indikator masing-masing variabel dilakukan selama musim kemarau dan hujan (Juli 2009 – Juni 2010), seperti tercantum dalam Tabel 17.

Semua indikator merupakan data per daerah resapan mata air.

Tabel 17. Jenis-jenis indikator beserta waktu pengumpulannya

Variabel	Indikator	Satuan	M.kemarau	M. hujan
Debit	Debit	$l.detik^{-1}$ ($dm^3.detik^{-1}$)	√	√
Curah hujan	Curah hujan	mm	√	√
Lahan	Kelerengan	%	√	
	Luas daerah resapan	ha	√	
Geofisik	Kedalaman akuifer	m	√	
	Ketebalan akuifer	m	√	
Biofisik tanah	C- organik	%	√	
	BI	$g.cm^{-3}$	√	
	Porositas	%	√	
	Tekstur (Pasir, debu, liat)	%	√	
	Kemantapan agregat	mm	√	
	KHJ	$cm.jam^{-1}$	√	
Vegetasi	Indeks Kualitas Biodiversitas		√	
	Penutupan kanopi	%	√	
	Kerapatan pohon	Individu	√	
	Kerapatan belta	Individu		
	Kerapatan (tumbuhan bawah)	Individu	√	√
	C stock	Mg	√	
Hidrologi	Kecepatan infiltrasi	$cm.jam^{-1}$		√
	Simpanan air tanah	mm	√	√

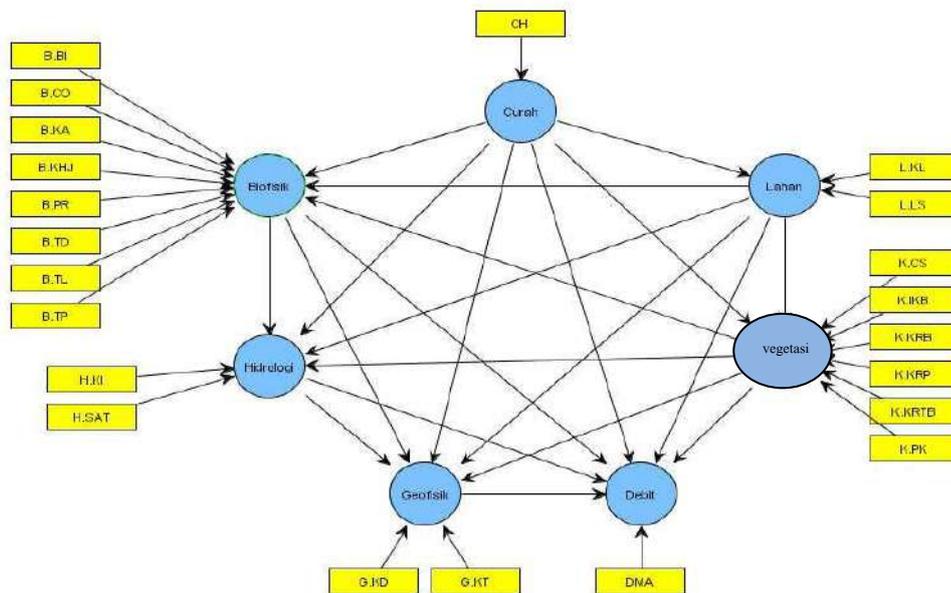
Model hubungan antara debit, curah hujan, karakteristik biogeohidrofisik dan vegetasi daerah resapan mata air akan dianalisis dengan *opensource software* yaitu *Smart PLS* (Ghozali, 2008; Arisoesilaningsih *et al.*, 2010; Indriyani *et al.*, 2011). Data disusun berpasangan sebanyak 72 data dalam satu periode pengamatan ke dalam bentuk tabel dengan menggunakan *MS Excel*. Selanjutnya, data dianalisis secara multivariat untuk menguji model persamaan struktural yang telah dirancang, menggunakan dengan tahapan seperti yang telah diuraikan pada BAB III, yaitu: 1) Merancang Model Struktural (*inner model*), 2) Merancang Model Pengukuran (*outer model*), 3) Mengkonstruksi diagram jalur, 4) Konversi Diagram Jalur ke Sistem persamaan, 5) Estimasi: Koefisien Jalur, *Loading* dan *Weight*, 6) Evaluasi *Goodness of Fit*, 7) Pengujian Hipotesis (*Resampling Bootstrapping*). Uji statistik menggunakan *t-test* dengan alfa 5 %. Jika *P-value* < 0,05, maka model bersifat nyata. *Outer model* nyata menunjukkan bahwa indikator bersifat valid, selanjutnya *Inner model* nyata menunjukkan bahwa

terdapat pengaruh nyata pada variabel-variabel yang diukur. Evaluasi *Goodness of Fit* model struktural (*Inner Model*) dengan pendekatan nilai *predictive-relevance* (Q^2) yang setara dengan R^2 dalam analisis regresi, dengan rumus : $Q^2 = 1 - (1 - R_1^2)(1 - R_2^2) \dots (1 - R_p^2)$.

- $R_1^2, R_2^2, \dots, R_p^2$: nilai R^2 dari variabel endogen di dalam model
- Nilai Q^2 terletak antara 0 hingga 100 %. Nilai yang semakin mendekati 100 % mengindikasikan semakin tinggi kesesuaian model.

6.3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan studi pustaka disusun rancangan model teoritis (model struktural) hubungan debit, curah hujan, karakteristik biogeohidrofisik dan karakteristik vegetasi di daerah resapan mata air (Gambar 67). Variabel laten (bentuk silindris) tersusun atas satu atau lebih indikator, yang digambarkan dalam bentuk persegi empat. Antar variabel satu dengan yang lain dihubungkan dengan tanda panah interaksi. Tujuh variabel berinteraksi satu sama lainnya, baik langsung atau tidak langsung mempengaruhi debit mata air. *Outer model* pada penelitian ini menggunakan indikator formatif dalam membentuk variabel laten. Spesifikasi model dan analisis jalur penelitian ini adalah:



Gambar 67. Rancangan Model Teoritis (Model Struktural) Hubungan antara Curah Hujan, Karakteristik Lahan, Karakteristik Biogeohidrofisik dan Karakteristik Vegetasi dengan Debit Mata Air



Outer model pada penelitian ini menggunakan indikator formatif dalam membentuk variabel latent. Pada model PLS di atas (Gambar 67) diperoleh *outer model* sebagai berikut:

1) Untuk variabel Lahan (L) dengan indikator formatif sebagai berikut:

$$L = \lambda_{11} L.KL + \lambda_{12} L.LS + \delta_1$$

Indikator:

L.KL = Kelerengan

L.LS = Luas daerah resapan

2) Untuk variabel Geofisik (G) dengan indikator formatif sebagai berikut:

$$G = \lambda_{21} G.KD + \lambda_{22} G.KT + \delta_2$$

di mana λ adalah *outer weight* indikator terhadap variabel latent, dan δ adalah error (residual) *outer model* pengukuran variabel latent.

Indikator:

G.KD = Kedalaman

G.KT = Ketebalan

3) Untuk variabel Biofisik Tanah (B) dengan indikator formatif sebagai berikut:

$$B = \lambda_{31} B.CO + \lambda_{32} B.BI + \lambda_{33} B.KA + \lambda_{34} B.KHJ + \lambda_{35} B.PR + \lambda_{36} B.TD + \lambda_{37} B.TL + \lambda_{38} B.TP + \delta_3$$

Indikator:

B.CO = C-Organik

B.BI = Berat Isi

B.KA = Kemantapan Agregat

B.KHJ = KHJ

B.PR = Porositas

B.TD = Tekstur Debu

B.TL = Tekstur Liat

B.TP = Tekstur Pasir

4) Untuk variabel Karakteristik vegetasi (K) dengan indikator formatif sebagai berikut:

$$K = \lambda_{41} K.IKB + \lambda_{42} K.PPK + \lambda_{43} K.KRP + \lambda_{44} K.KRB + \lambda_{45} K.KRTB + \lambda_{46} K.CS + \delta_4$$

Indikator:

K.IKB = Indeks Kualitas Biodiversitas

K.PK = Penutupan Kanopi

KRP = Kerapatan Pohon



K.KRB = Kerapatan Belta
 K.KRTB = Kerapatan Tumbuhan Bawah
 K.CS = *C Stock*

5) Untuk variabel Hidrologi (H) dengan indikator formatif sebagai berikut:

$$H = \lambda_{51} H.KI + \lambda_{51} H.SAT + \delta_5$$

Indikator:

H.KI = Kecepatan Infiltrasi
 H.SAT = Simpanan Air Tanah

Untuk dua variabel lain yaitu Curah Hujan (C) dan Debit Mata Air (D) diukur oleh satu indikator saja.

Akan tetapi, pembentukan model struktural hubungan variabel-variabel sesuai model di atas tidak berhasil dilakukan. Hal ini karena terdapat dua variabel yang bermasalah, yaitu karakteristik biofisik dan karakteristik vegetasi. Kedua variabel tersebut memiliki indikator-indikator yang hampir sama. Dilakukan pengujian korelasi antara indikator-indikator di dalam dua variabel tersebut. Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang kuat (R^2 hampir mendekati 1) di antara indikator-indikator biofisik tanah dan karakteristik vegetasi (Lampiran 2.). Demikian juga saat dilakukan uji korelasi antara beberapa indikator dalam biofisik tanah (B.CO, B. BI dan B.PR) dan indikator dalam karakteristik vegetasi (K.CS dan K.PK), dimana terdapat korelasi yang sangat erat di antara indikator-indikator tersebut (Lampiran 3.).

Langkah untuk mengatasi kesulitan di atas adalah dengan melakukan analisis komponen utama (*Principal Component Analysis*) untuk mengukur tiap variabelnya. Dengan PCA berarti mengukur indikator menjadi variabel, dimana diberikan pembobot (*weight*) yang dapat digunakan untuk menginterpretasi terhadap setiap komponen yang bermakna. Komponen dengan bobot terbesar berarti merupakan komponen penyusun terbesar dari variabel yang bersangkutan, sedangkan tanda (positif atau negatif) menunjukkan arah.

Hasil PCA terhadap variabel Lahan, Geofisik, Biofisik, Vegetasi dan Hidrologi tercantum dalam Lampiran 4. Analisis komponen utama variabel Lahan menghasilkan dua indikator yaitu Luas daerah resapan dan kelerengannya. Luas daerah resapan mengukur variabel Lahan dengan sama baiknya dengan bobot masing-masing



sebesar 0,707 dan -0,707. Oleh karena memiliki nilai sama, maka harus dipilih salah satu indikator yang dapat mewakili karakteristik Lahan. Luas daerah resapan (L.LS) dipilih sebagai indikator yang mewakili karakteristik Lahan.

Demikian pula analisis komponen utama terhadap variabel Geofisik menghasilkan bobot ketebalan akuifer (G.KT) yang sama besarnya dengan kedalaman akuifer (G.KD). Telah ditentukan kedalaman akuifer (G.KD) yang mewakili variabel ini.

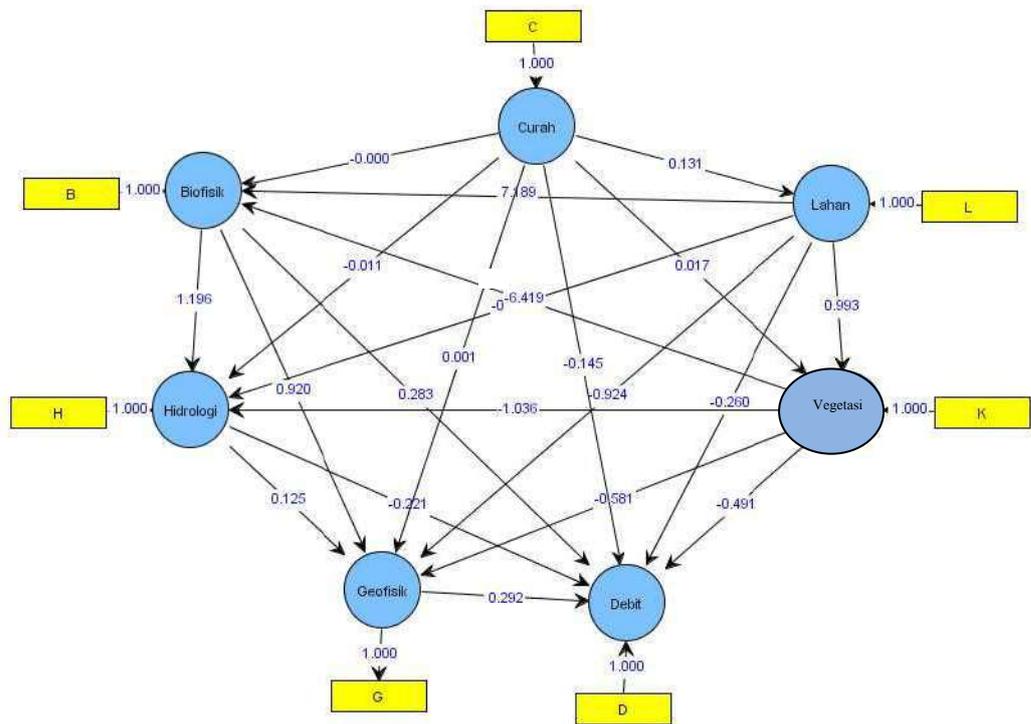
Hasil analisis komponen utama terhadap variabel Biofisik tanah menunjukkan KHJ (B.KHJ) dan kandungan C-organik tanah (B.CO) memiliki bobot yang paling besar, yaitu berturut-turut -0,409 dan -0,404. Dengan pertimbangan kandungan C-organik lebih mudah diubah untuk upaya optimalisasi, maka kandungan C-organik (B.CO) dipilih untuk mewakili variabel Biofisik tanah.

Analisis komponen utama terhadap variabel karakteristik vegetasi menunjukkan indikator Kerapatan Belta (K.KRB) dengan bobot tertinggi, yaitu 0,435. Dengan demikian indikator K.KRB paling kuat mengukur Karakteristik vegetasi.

Sedangkan hasil analisis komponen utama variabel Hidrologi menunjukkan kedua indikator, yaitu kecepatan infiltrasi (H.KI) dan simpanan air tanah (H.SAT) memiliki bobot sama besar, yaitu 0,707 dan -0,707. Hal ini menunjukkan kedua indikator H.KI dan H.SAT sama kuatnya mengukur variabel Hidrologi, sehingga Kecepatan infiltrasi ditentukan untuk mewakili variabel Hidrologi.

Selanjutnya, dilakukan analisis PLS kembali dengan indikator-indikator baru yang merupakan indikator terpilih dari masing-masing pengukurannya. Hasil analisis PLS model hubungan antara curah hujan, karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan karakteristik vegetasi di daerah resapan dengan debit mata air ditunjukkan pada Gambar 68.

Sebelum model yang dihasilkan analisis PLS layak diinterpretasikan atau tidak, terlebih dahulu dilakukan pengujian *Goodness of Fit model*, dengan pendekatan nilai *predictive-relevance* Q^2 yang setara dengan R^2 dalam analisis regresi. Nilai Q^2 terletak antara 0% hingga 100%. Nilai yang semakin mendekati 100% mengindikasikan semakin tinggi kesesuaian model. Nilai koefisien determinasi tiap persamaan variabel endogen disajikan pada Tabel 18.



Gambar 68. Model Hubungan antara Curah Hujan, Karakteristik Lahan, Karakteristik Biogeohidrofisik dan Karakteristik Vegetasi di Daerah Resapan Mata Air dengan Debit Mata Air Berdasar Analisis PLS

Tabel 18. Nilai R^2 dan *Goodness of Fit Model*

Persamaan Struktural (Inner)	Nilai R^2
CH → L	$R_1^2 = 0,017 = 1,7 \%$
CH, L → K	$R_2^2 = 0,991 = 99,1 \%$
CH, L, K → B	$R_3^2 = 1,00 = 100 \%$
CH, L, K, B → G	$R_4^2 = 1,00 = 100 \%$
CH, L, K, B, G → H	$R_5^2 = 0,767 = 76,7 \%$
CH, L, K, B, G, H → D	$R_6^2 = 0,461 = 46,1 \%$

Dari tabel di atas diketahui nilai R^2 masing-masing variabel endogen yang dapat diterangkan sebagai berikut:

1. Nilai R^2 untuk variabel Lahan (L) sebesar 1,7 % mengindikasikan bahwa sebesar 1,7 % Lahan (L) dipengaruhi oleh Curah Hujan (C).
2. Nilai R^2 untuk variabel Karakteristik vegetasi (K) sebesar 99,1% mengindikasikan bahwa sebesar 99,1 % Karakteristik vegetasi (K) dipengaruhi oleh Curah Hujan (C) dan Lahan (L).

3. Nilai R^2 untuk variabel Biofisik Tanah (B) sebesar 100% mengindikasikan bahwa sebesar 100 % Biofisik Tanah (B) dipengaruhi oleh Curah Hujan (C), Lahan (L) dan Karakteristik vegetasi (K).
4. Nilai R^2 untuk variabel Hidrologi (H) sebesar 76,7 % mengindikasikan bahwa sebesar 76,7 % Hidrologi (H) dipengaruhi oleh Curah Hujan (C), Lahan (L), Karakteristik vegetasi (K), Biofisik Tanah (B) dan Geofisik (G).
5. Nilai R^2 untuk variabel Geofisik (G) sebesar 100 % mengindikasikan bahwa sebesar 100 % Geofisik (G) dipengaruhi oleh Curah Hujan (C), Lahan (L), Karakteristik vegetasi (K) dan Biofisik Tanah (B).
6. Nilai R^2 untuk variabel Debit Mata Air (D) sebesar 46,1% mengindikasikan bahwa sebesar 46,1% Debit mata Air (D) dipengaruhi oleh Curah Hujan (C), Lahan (L), Karakteristik vegetasi (K), Biofisik Tanah (B), Geofisik (G) dan Hidrologi (H).

Kemudian dilakukan perhitungan Nilai *predictive-relevance* Q^2 dengan rumus:

$$Q^2 = 1 - (1 - R_1^2) (1 - R_2^2) (1 - R_3^2) (1 - R_4^2) (1 - R_5^2) (1 - R_6^2)$$

$$Q^2 = 1 - (1 - 0,017) (1 - 0,991) (1 - 1) (1 - 0,767) (1 - 1) (1 - 0,461)$$

$$Q^2 = 1 = 100 \%$$

Hasil perhitungan memperlihatkan nilai *predictive-relevance* sebesar 100%. Nilai *predictive relevance* sebesar 100 % mengindikasikan bahwa keragaman data yang dapat dijelaskan oleh model tersebut adalah sebesar 100 % atau dengan kata lain informasi yang terkandung dalam data seluruhnya dapat dijelaskan oleh model tersebut. Dengan demikian model PLS yang telah terbentuk telah sesuai.

Selanjutnya dilakukan pengujian asumsi linieritas dalam PLS. Alat yang digunakan adalah pendekatan *Curve Fit*. Hubungan antar variabel yang diteliti memenuhi asumsi linieritas jika: (1) model linier signifikan, dengan kriteria model linier memiliki $P\text{-value} < 0,05$, (2) seluruh model yang mungkin non signifikan, dengan kriteria seluruh model memiliki $P\text{-value} > 0,05$. Hasil pengujian disajikan secara ringkas pada Tabel 19.

Dari tabel tersebut terlihat bahwa nilai $P\text{-value}$ (Sig) Model Linier semua hubungan memiliki nilai kurang dari 0,05, sehingga kedua puluh satu hubungan di atas adalah dalam bentuk linier. Dengan demikian asumsi linieritas terpenuhi.

Dengan melihat tingginya Q^2 *predictive-relevance* (100%) dan terpenuhinya asumsi linieritas, dengan demikian model PLS yang terbentuk telah layak dan hasilnya dapat digunakan untuk pengujian hipotesis hubungan antar variabel.

Tabel 19. Hasil Pengujian Asumsi Linieritas

Hubungan	Hasil Pengujian	Kesimpulan
Curah Hujan terhadap Lahan	P-value Linier = 0,000	Linier
Lahan terhadap Karakteristik vegetasi	P-value Linier = 0,000	Linier
Curah Hujan terhadap Karakteristik vegetasi	P-value Linier = 0,000	Linier
Curah Hujan terhadap Biofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Lahan terhadap Biofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Karakteristik vegetasi terhadap Biofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Curah Hujan terhadap Geofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Lahan terhadap Geofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Karakteristik vegetasi terhadap Geofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Biofisik terhadap Geofisik	P-value Linier = 0,000	Linier
Curah Hujan terhadap Hidrologi	P-value Linier = 0,000	Linier
Lahan terhadap Hidrologi	P-value Linier = 0,000	Linier
Karakteristik vegetasi terhadap Hidrologi	P-value Linier = 0,000	Linier
Biofisik terhadap Hidrologi	P-value Linier = 0,000	Linier
Geofisik terhadap Hidrologi	P-value Linier = 0,000	Linier
Curah Hujan terhadap Debit Mata Air	P-value Linier = 0,000	Linier
Lahan terhadap Debit Mata Air	P-value Linier = 0,000	Linier
Karakteristik vegetasi terhadap Debit Mata Air	P-value Linier = 0,000	Linier
Biofisik terhadap Debit Mata Air	P-value Linier = 0,000	Linier
Geofisik terhadap Debit Mata Air	P-value Linier = 0,000	Linier
Hidrologi terhadap Debit Mata Air	P-value Linier = 0,004	Linier

Setelah pengujian ketepatan model, selanjutnya dilakukan pengujian *inner model*, yang pada intinya menguji hipotesis hubungan antar variabel. Pengujian hipotesis dilakukan dengan uji t (T-stat) pada masing-masing jalur pengaruh antar variabel. Hasil analisis pengujian terangkum dalam Tabel 20 sebagai berikut:

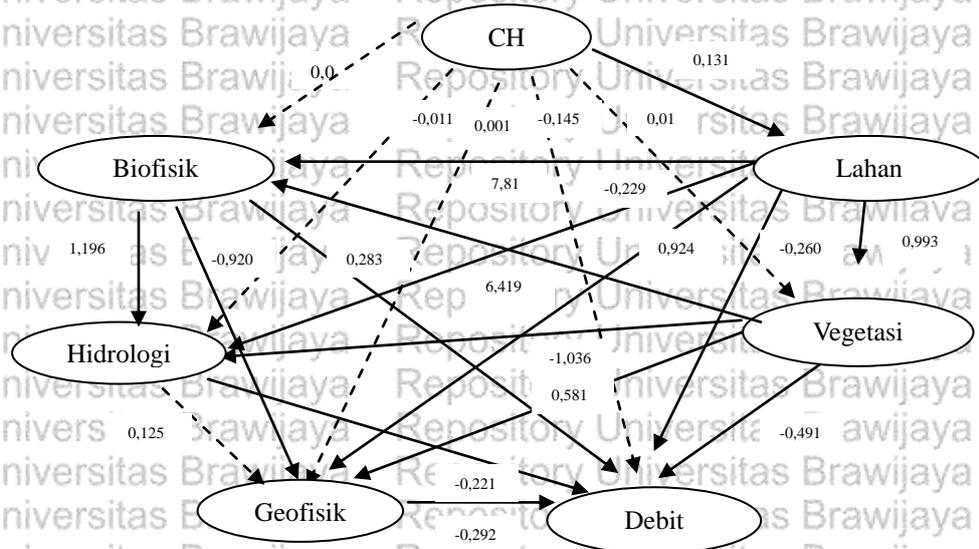
Tabel 20. Hasil Pengujian Hipotesis dalam *Inner Model* Hubungan Variabel Curah Hujan, Lahan, Geofisik, Biofisik tanah, Karakteristik vegetasi,

Hidrologi dan Debit

Hubungan	Koefisien Inner	T-Stat	P-value
Curah Hujan terhadap Lahan	0,131	3,275	0,001*
Curah Hujan terhadap Karakteristik vegetasi	0,017	1,545	0,122
Lahan terhadap Karakteristik vegetasi	0,993	993,00	0,000*
Curah Hujan terhadap Biofisik	0,000	0,000	1,000
Lahan terhadap Biofisik	7,189	30,333	0,000*
Karakteristik vegetasi terhadap Biofisik	6,419	26,858	0,000*
Curah Hujan terhadap Hidrologi	-0,011	0,314	0,753
Lahan terhadap Hidrologi	-0,229	3,137	0,002*
Karakteristik vegetasi terhadap Hidrologi	-1,036	3,727	0,000*
Biofisik terhadap Hidrologi	1,196	9,803	0,000*
Curah Hujan terhadap Geofisik	0,001	0,017	0,986
Lahan terhadap Geofisik	0,924	2,369	0,018*
Karakteristik vegetasi terhadap Geofisik	0,581	4,368	0,000*
Biofisik terhadap Geofisik	-0,920	3,446	0,001*
Hidrologi terhadap Geofisik	0,125	0,030	0,976
Curah Hujan terhadap Debit Mata Air	-0,145	0,321	0,748
Lahan terhadap Debit Mata Air	-0,260	4,333	0,000*
Karakteristik vegetasi terhadap Debit	-0,491	2,571	0,010*
Biofisik terhadap Debit Mata Air	0,283	2,264	0,024*
Hidrologi terhadap Debit Mata Air	-0,221	4,420	0,000*
Geofisik terhadap Debit Mata Air	-0,292	2,631	0,009*

Keterangan: Tanda * menyatakan signifikan pada taraf 5%

Dari tabel tersebut terlihat 15 dari 21 hubungan bersifat signifikan. Hasil pengujian hipotesis jalur-jalur pengaruh langsung yang signifikan ($P\text{-value} < 0,1$) dapat dilihat pada Gambar 69 di bawah ini:



Gambar 69. Hasil Pengujian Hipotesis Model Hubungan Variabel Curah Hujan, Lahan, Geofisik, Biofisik tanah, Karakteristik vegetasi, Hidrologi dan Debit mata air (Keterangan: garis lurus menyatakan hubungan signifikan dan garis putus-putus menyatakan hubungan tidak signifikan)

Dari hasil pengujian hipotesis Model *PLS* di atas diketahui bahwa hampir semua variabel secara langsung mempengaruhi Debit mata air, kecuali Curah Hujan (Gambar 69.). Curah hujan tidak signifikan secara langsung mempengaruhi Debit mata air. Hal ini disebabkan adanya waktu tinggal (*residence time*) antara proses pengisian akuifer dengan keluarnya debit mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat yang cukup lama sekitar 4-6 bulan (seperti yang telah diterangkan di BAB IV).

Variabel Lahan (luas daerah resapan) berpengaruh negatif terhadap Debit mata air dengan koefisien *inner weight* sebesar -0,260. Semakin luas daerah resapan maka debit mata air semakin kecil. Hasil analisis *PLS* di atas berbeda dengan Todd and Mays (2005) yang menyatakan besarnya debit mata air tergantung pada luas daerah resapan yang berkontribusi akuifer dan besarnya resapan tersebut. Semakin luas daerah resapan maka semakin besar debit mata air. Hal ini mengindikasikan ada variabel lain yang mempengaruhi debit mata air, sehingga semakin luas daerah resapan debit mata air semakin kecil. Hasil model di atas menunjukkan luas daerah resapan berpengaruh positif terhadap karakteristik vegetasi (kerapatan belta) dan biofisik tanah, sehingga semakin luas daerah resapan semakin rapat jenis beltanya dan semakin banyak kandungan C-



organik tanahnya. Akan tetapi, luas daerah resapan berpengaruh negatif terhadap hidrologi (kecepatan infiltrasi) dan Geofisik (kedalaman akuifer). Hal ini karena jenis vegetasi (pohon dan belta) yang mendominasi daerah resapan ketiga mata air adalah kopi (*C. canephora*) dan sengon (*A. falcataria*). Evapotranspirasi tinggi dari jenis-jenis tersebut dapat mengurangi kecepatan infiltrasi air ke dalam tanah, dan pengisian akuifer. Hal ini akan menambah kedalaman akuifer, sehingga debit mata air kecil.

Variabel Biofisik tanah mempengaruhi Debit mata air dengan koefisien *inner weight* sebesar -0,283. Hal ini menunjukkan semakin tinggi biofisik tanah (C-organik), maka debit mata air semakin besar. Kandungan C-organik tanah yang tinggi dapat memperbaiki biofisik tanah, sehingga resapan air tanah meningkat dan debit mata air pun meningkat. Biofisik tanah juga berpengaruh positif terhadap Hidrologi (1,196), tetapi berpengaruh negatif terhadap Geofisik (-0,920). Semakin tinggi kandungan C-organik tanah, maka semakin cepat kecepatan infiltrasinya dan semakin dangkal kedalaman akuifernya. Sedangkan Biofisik tanah dipengaruhi positif oleh Lahan (luas daerah resapan) dengan koefisien *inner weight* sebesar 7,81 dan karakteristik vegetasi (kerapatan belta) dengan koefisien *inner weight* sebesar 6,42. Hubungan yang terjadi karena luas daerah resapan berpengaruh positif terhadap kerapatan belta dan kerapatan belta berpengaruh positif terhadap Biofisik Tanah (C-organik).

Variabel Karakteristik vegetasi berpengaruh negatif terhadap Debit mata air dengan koefisien *inner weight* -0,491. Semakin tinggi karakteristik vegetasi (kerapatan belta), maka semakin kecil debit mata airnya. Hal ini berkaitan dengan dominansi jenis pohon dan belta di daerah resapan mata air, yaitu pohon pinus (*P. merkusii*), sengon laut (*A. falcataria*) dan kopi robusta (*C. canephora*). Ketiga jenis pohon dan belta ini memiliki evapotranspirasi yang tinggi. Hasil penelitian Knight and Will (1977) dalam Hamilton and King (1983) menunjukkan bahwa setelah 12 tahun pertumbuhan, tegakan muda *Pinus radiata* justru mengurangi banyaknya air yang meresap ke dalam tanah sebesar 165 mm.th⁻¹. Hal yang sama dikemukakan oleh Soedjoko *et al.* (1998) bahwa evapotranspirasi yang terjadi di hutan pinus mencapai kisaran sebesar 1002 - 1253 mm/th atau 29-69 % dari hujan tahunan yang jatuh. Sengon laut (*A. falcataria*) merupakan jenis pohon



yang mengalami evapotranspirasi tinggi, sehingga jenis ini membutuhkan rata-rata hujan tahunan sebanyak 2000–3500 mm (Soerianegara *and* Lemmens, 1993). Diketahui pula hubungan antara Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) yang berpengaruh negatip terhadap Hidrologi (kecepatan infiltrasi) dengan koefisien *inner weight* sebesar -1,04 dan berpengaruh positip terhadap Geofisik (kedalaman akuifer) dengan koefisien *inner weight* sebesar 0,581. Hal ini menunjukkan Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) semakin rapat, maka kecepatan infiltrasi semakin lambat dan Geofisik (kedalaman akuifer) semakin dalam.

Variabel Hidrologi berpengaruh nyata terhadap debit mata air dengan koefisien *inner weight* sebesar -0,221. Hal ini menunjukkan Hidrologi (kecepatan infiltrasi) semakin cepat, maka Debit mata air semakin kecil. Hubungan ini muncul karena pengaruh negatip Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) terhadap Hidrologi, sehingga mengurangi kecepatan infiltrasi dan proses pengisian kembali air tanah menjadi lebih lambat.

Variabel Geofisik mempengaruhi Debit mata air dengan koefisien *inner weight* sebesar -0,292. Hal ini menunjukkan semakin dalam Geofisik (kedalaman akuifer), maka debit mata air semakin kecil. Semakin dalam akuifer menyebabkan jarak tempuh yang harus dilalui air tanah dari akuifer ke permukaan tanah semakin jauh, sehingga debit menjadi kecil. Geofisik (kedalaman akuifer) dipengaruhi positip oleh karakteristik vegetasi (0,581) dan Lahan (0,924), serta dipengaruhi negatip oleh biofisik tanah (-0,92).

Debit mata air dipengaruhi secara signifikan oleh Lahan, Vegetasi, Biofisik tanah, Hidrologi dan Geofisik. Berdasarkan *koefisien inner* hubungan variabel-variabel yang mempengaruhi debit mata air secara langsung, diketahui karakteristik vegetasi (kerapatan belta) memiliki nilai *koefisien inner tertinggi* yaitu -0,491. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik vegetasi (kerapatan belta) merupakan variabel yang paling dominan dalam menentukan debit mata air. Sebesar 0,491 debit mata air dipengaruhi secara langsung oleh Karakteristik vegetasi (kerapatan belta), akan tetapi pengaruhnya tersebut bernilai negatip. Artinya jumlah belta semakin rapat, maka debit akan semakin kecil.

6.5. KESIMPULAN



1. Karakteristik vegetasi, Geofisik, Biofisik tanah, Lahan dan Hidrologi mempengaruhi debit mata air secara nyata. Sedangkan Curah hujan berpengaruh tidak langsung ke debit mata air. Model PLS yang dihasilkan memiliki nilai *predictive relevance* Q^2 sebesar 100%, sehingga model layak digunakan dan memiliki nilai prediktif yang sangat relevan.
2. Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) merupakan variabel yang berpengaruh paling nyata terhadap debit mata air. Jumlah belta yang semakin rapat, maka debit mata air semakin kecil.



VII. MAKSIMALISASI DEBIT MATA AIR BERDASARKAN OPTIMALISASI KARAKTERISTIK VEGETASI DAN BIOGEOHIDROFISIK DAERAH RESAPANNYA DENGAN *RESPONSE SURFACE ANALYSIS*

ABSTRAK

Penghijauan terprogram dapat dilakukan dengan upaya optimalisasi karakteristik vegetasi dan biogeohidrofisik daerah resapan, sehingga upaya memaksimalkan debit mata air bisa dilakukan. Untuk itu dilakukan analisis *Response Surface* terhadap variabel-variabel yang berpengaruh langsung terhadap debit mata air. Hasil analisis *Response Surface* menunjukkan upaya memaksimalkan debit dilakukan dengan meminimalisasi kedalaman akuifer (Geofisik) dan memaksimalkan kecepatan infiltrasi (Hidrologi). Kecepatan infiltrasi dimaksimalisasikan dengan optimalisasi kerapatan belta (karakteristik vegetasi). Debit mata air maksimal sebesar 0,48 l.detik⁻¹ akan tercapai pada kedalaman akuifer 0,93 m.

Kata kunci: maksimalisasi, vegetasi, biogeohidrofisik, debit, Analisis *Response Surface*

7.1. PENDAHULUAN

Alih guna hutan yang menghilangkan atau mengganti tutupan vegetasi dapat meningkatkan erosi dan mengurangi porositas tanah, sehingga mengurangi kemampuan tanah menyimpan air. Di daerah Kumaun, Pegunungan Himalaya terjadi pengurangan debit mata air akibat penggantian *Quercus spp.*, jenis tumbuhan asli di wilayah ini dengan pinus (Singh and Pande, 1999). Berdasar pengamatan terhadap fisik tanahnya diketahui tanah di bawah hutan *Quercus spp.*, menghasilkan kapasitas simpanan air tanah (81,3 %) dua kali lebih besar dari tanah di bawah pinus (43%). Negi and Joshi (2004) menyatakan debit mata air dipengaruhi oleh curah hujan dan karakteristik daerah resapannya. Menurunnya debit mata air di Kecamatan Ngantang juga diduga akibat alih guna hutan, yang terjadi sejak puluhan tahun lalu.

Hasil analisis hubungan antara karakteristik vegetasi dan karakteristik biogeohidrofisik daerah resapan dengan debit mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat di Kecamatan Ngantang menggunakan *Partial Least Square (PLS)* menunjukkan bahwa Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) memiliki pengaruh yang paling kuat terhadap debit mata air. Akan tetapi pengaruhnya tersebut bernilai negatif, artinya jumlah belta semakin rapat maka debit mata air semakin kecil. Hal ini nampaknya berkaitan dengan jenis pohon dan belta yang mendominasi ketiga daerah resapan mata air. Jenis pinus (*Pinus merkusii*),



sengon laut (*Albizia falcataria*) dan kopi robusta (*Coffea canephora* var. robusta) merupakan jenis pohon dan belta yang mendominasi daerah ini. Dengan demikian, semakin meningkatnya kerapatan jenis tanaman tersebut, maka debit mata air semakin menurun.

Berdasarkan hubungan antara karakteristik vegetasi dengan debit mata air, maka kegiatan penghijauan terprogram perlu dilakukan. Penghijauan yang dapat menciptakan ekosistem lebih stabil, sehingga fungsi hidrologis daerah resapan mata air dapat berjalan optimal. Penghijauan terprogram tersebut bisa dilakukan dengan upaya optimalisasi daerah resapan mata air, sehingga maksimalisasi debit mata air dapat dilakukan. Untuk itu dilakukan analisis *Response Surface* terhadap karakteristik daerah resapan yang berpengaruh langsung terhadap debit mata air.

Hasil *out put* analisis ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi kegiatan konservasi mata air.

7.2. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan sama dengan data yang digunakan dalam analisis *PLS* (Bab VI). Data merupakan data kuantitatif debit mata air, curah hujan, karakteristik lahan, biogeohidrofisik dan karakteristik vegetasi di tiga daerah resapan mata air, yaitu mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat. Dari hasil *PCA* (Bab VI) diperoleh setiap variabel diwakili satu indikator terpilih. Data terdiri dari:

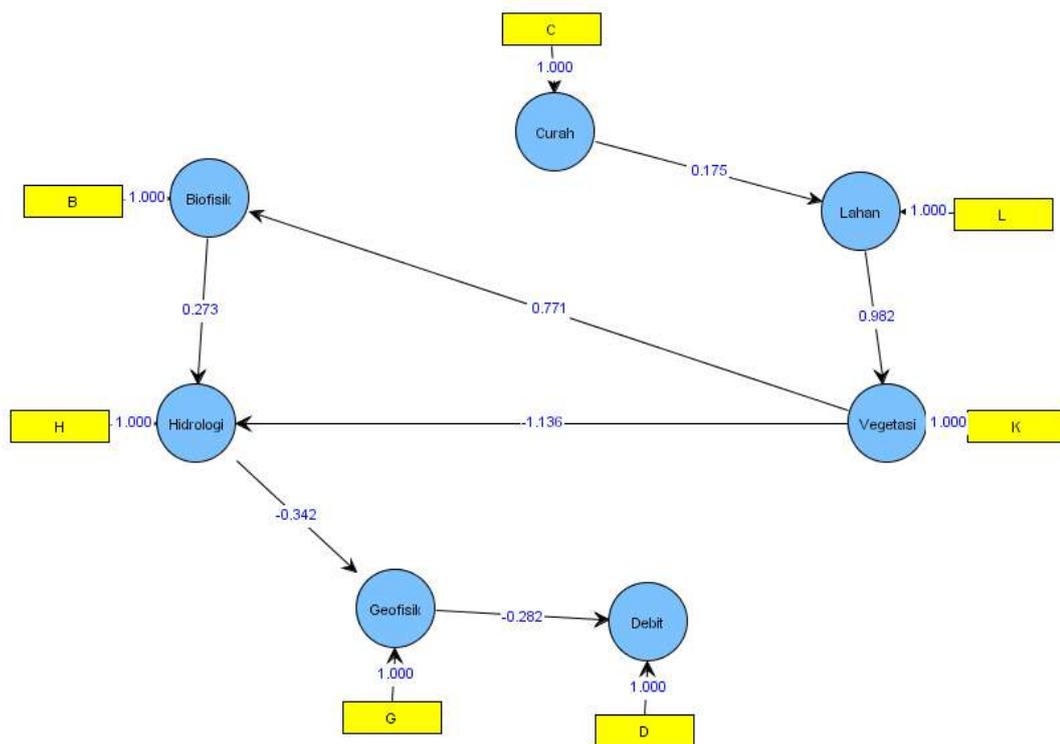
1. Variabel Debit (D) terdiri dari indikator Debit (D): $l \cdot \text{detik}^{-1} (\text{dm}^3 \cdot \text{detik}^{-1})$
2. Variabel Curah hujan terdiri dari indikator curah hujan (CH): mm
3. Variabel Geofisik (G) diwakili indikator kedalaman akuifer (G.KD): m
4. Variabel Lahan (L) diwakili oleh indikator luas daerah resapan (L.LS): ha
5. Variabel Biofisik tanah (B) diwakili oleh indikator C-Organik tanah (B.CO): %
6. Variabel Karakteristik vegetasi diwakili oleh indikator Kerapatan Belta (K.KRB): individu per daerah resapan
7. Variabel Hidrologi mata air diwakili oleh indikator Kecepatan Infiltrasi (H.KI): $\text{cm} \cdot \text{jam}^{-1}$

Analisis *Response Surface* dengan menggunakan Program Minitab 14 menghasilkan nilai minimal dan maksimal variabel respon. Pada penelitian ini variabel respon (endogen) ada enam yaitu Lahan, Karakteristik vegetasi, Biofisik Tanah, Hidrologi, Geofisik dan Debit mata air. Optimalisasi dilakukan dengan melakukan pengujian antara variabel-variabel yang signifikan mempengaruhi variabel yang akan dioptimalisasi dengan analisis *Response Surface*. Informasi variabel yang signifikan diperoleh dari hasil model *PLS* (Bab VI). Dari hasil analisis *Response Surface* diperoleh hasil uji parsial hubungan antar variabel dan model optimalisasi suatu variabel. Kemudian dilakukan pula uji kelayakan model, dengan melakukan analisis residual. Hal yang harus dilakukan dalam analisis residual, yaitu memeriksa kenormalan residual. Setelah kenormalan residual terpenuhi, maka optimalisasi suatu variabel dilakukan dengan penentuan nilai perkiraan minimal dan maksimal dari variabel yang dioptimalisasi. Dari hasil *output* Analisis *Response Surface* yang berupa nilai minimal dan maksimal variabel respon, maka dipilih nilai yang sesuai dengan hubungan variabel respon (sesesuai dengan model *PLS*).

7.3. HASIL DAN PEMBAHASAN

7.3.1. Perbaikan model *PLS*

Analisis *Response Surface* dilakukan berdasarkan hubungan-hubungan yang signifikan di dalam model *PLS* (Bab VI). Akan tetapi, berdasar model tersebut analisis *Response Surface* yang dilakukan tidak bisa menghasilkan *output*. Oleh karena itu diperlukan perbaikan model agar optimalisasi bisa dilakukan. Perbaikan model dilakukan dengan hanya melakukan analisis terhadap beberapa variabel yang berpengaruh langsung dan signifikan terhadap variabel lainnya, sehingga dihasilkan *reduced model PLS* dan indikator yang digunakan merupakan indikator terpilih dari masing-masing pengukurannya (Gambar 70.)



Gambar 70. *Reduced model*, Model Hubungan antara Curah Hujan, Karakteristik Lahan, Karakteristik Biogeohidrofisik dan Karakteristik Vegetasi di Daerah Resapan dengan Debit Mata Air

Keterangan: C: curah hujan (mm); L: luas daerah resapan (ha); K: kerapatan belta (individu per daerah resapan); B: C-organik tanah (%); H: kecepatan infiltrasi (cm.jam⁻¹); G: kedalaman akuifer (m); D: debit mata air (l.detik⁻¹)

Dilakukan kembali pengujian *Goodness of Fit model* dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 21. Nilai R² dan *Goodness of Fit Reduced Model*

Persamaan Struktural (Inner)	Nilai R ²
C → L	0,031
C, L → K	0,964
C, L, K → B	0,595
C, L, K, B → H	0,887
C, L, K, B, H → G	0,117
C, L, K, B, G, H → D	0,080

Nilai *predictive-relevance* Q² diperoleh dengan rumus:

$$Q^2 = 1 - (1 - R_1^2) (1 - R_2^2) (1 - R_3^2) (1 - R_4^2) (1 - R_5^2) (1 - R_6^2)$$

$$Q^2 = 1 - (1 - 0,031) (1 - 0,964) (1 - 0,595) (1 - 0,887) (1 - 0,117) (1 - 0,080)$$

$$Q^2 = 99,68 \%$$



Hasil perhitungan memperlihatkan nilai *predictive-relevance* sebesar 99,68 %. Nilai *predictive relevance* sebesar 99,68 % mengindikasikan bahwa keragaman data yang dapat dijelaskan oleh model tersebut adalah sebesar 99,68 % atau dengan kata lain informasi yang terkandung dalam data 99,68 % dapat dijelaskan oleh model tersebut. Sedangkan sisanya 0,32 % dijelaskan oleh variabel lain (yang belum terkandung dalam model) dan *error*. Dengan demikian model *PLS* yang telah terbentuk telah sesuai.

Selanjutnya dilakukan pengujian asumsi linieritas dalam *PLS*. Alat yang digunakan adalah pendekatan *Curve Fit*. Hubungan antar variabel yang diteliti memenuhi asumsi linieritas jika: (1) model linier signifikan, dengan kriteria model linier memiliki $P\text{-value} < 0,05$, (2) seluruh model yang mungkin non signifikan, dengan kriteria seluruh model memiliki $P\text{-value} > 0,05$. Hasil Pengujian secara ringkas disajikan sebagai berikut:

Tabel 22. Hasil Pengujian Asumsi Linieritas

Hubungan	Hasil Pengujian	Kesimpulan
Curah Hujan terhadap Lahan	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Lahan terhadap Karakteristik vegetasi	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Karakteristik vegetasi terhadap Biofisik	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Karakteristik vegetasi terhadap Hidrologi	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Biofisik terhadap Hidrologi	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Biofisik terhadap Geofisik	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Hidrologi terhadap Geofisik	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier
Geofisik terhadap Debit Mata Air	$P\text{-value Linier} = 0,000$	Linier

Dari tabel di atas terlihat bahwa nilai $P\text{-value}$ (Sig) Model Linier semua hubungan memiliki nilai kurang dari 0,05, sehingga delapan hubungan di atas adalah dalam bentuk linier. Dengan demikian asumsi linieritas terpenuhi. Dengan melihat tingginya Q^2 *predictive-relevance* yang mendekati hampir 100% dan terpenuhinya asumsi linieritas, maka model *PLS* yang terbentuk telah layak dan hasilnya dapat digunakan untuk pengujian hipotesis hubungan antar variabel.

Selanjutnya dilakukan pengujian *inner model*, yang pada intinya menguji hipotesis hubungan antar variabel. Pengujian hipotesis dilakukan dengan uji t (T-



stat) pada masing-masing jalur pengaruh antar variabel. Hasil pengujian disajikan ringkas pada Tabel 23.

Tabel 23. Hasil Pengujian Hipotesis dalam *Inner Model* (Pengaruh Langsung)

Hubungan	Koefisien Inner	T-Stat	P-value
Curah Hujan terhadap Lahan	0,175	1,551	0,121
Lahan terhadap Karakteristik vegetasi	0,982	328,459	0,000*
Karakteristik vegetasi terhadap Biofisik	0,771	20,835	0,000*
Karakteristik vegetasi terhadap Hidrologi	-1,136	23,162	0,000*
Biofisik terhadap Hidrologi	0,273	4,118	0,000*
Hidrologi terhadap Geofisik	-0,342	4,101	0,000*
Geofisik terhadap Debit Mata Air	-0,282	2,431	0,015*

Keterangan: Tanda * menyatakan signifikan pada taraf 5%,

Dari pengaruh langsung di atas diperoleh hasil hubungan antar variabel sebagai berikut:

1. Lahan (Luas daerah resapan) berpengaruh positif terhadap Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) dengan koefisien *inner weight* sebesar 0,982. Semakin luas daerah resapan, maka jumlah belta semakin rapat.
2. Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) berpengaruh positif terhadap Biofisik tanah (C-organik tanah) dengan koefisien *inner weight* sebesar 0,771. Hal ini menunjukkan semakin rapat jenis belta, maka kandungan C-organik tanah juga semakin tinggi. Jumlah belta semakin rapat diharapkan semakin banyak seresah yang dihasilkan, sehingga akan meningkatkan C-organik.
3. Karakteristik vegetasi (kerapatan belta) berpengaruh negatif terhadap Hidrologi (kecepatan infiltrasi) dengan koefisien *inner weight* sebesar -1,136. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan jenis belta semakin rapat, maka akan menurunkan kecepatan infiltrasi. Pada umumnya semakin tinggi kerapatan vegetasi, maka kecepatan infiltrasi meningkat. Rendahnya kecepatan infiltrasi pada jenis belta yang rapat disebabkan



tingginya evapotranspirasi jenis-jenis belta yang mendominasi di daerah resapan, seperti kopi (*C. canephora*), sengon laut (*A. falcataria*) dan pinus (*P. merkusii*).

4. Biofisik tanah (kandungan C-organik tanah) berpengaruh positif terhadap Hidrologi (kecepatan infiltrasi) dengan koefisien *inner weight* sebesar 0,273. Peningkatan C-organik tanah menyebabkan peningkatan kecepatan infiltrasi. Dengan tingginya C-organik tanah akan memperbaiki sifat fisik tanah (meningkatkan porositas, kemantapan agregat dan KHI tanah, serta menurunkan BI tanah), sehingga kecepatan infiltrasi air ke dalam tanah berlangsung cepat.

5. Hidrologi (kecepatan infiltrasi) berpengaruh negatif terhadap Geofisik (kedalaman akuifer) dengan koefisien *inner weight* sebesar -0,342. Hal ini mengindikasikan kecepatan infiltrasi yang cepat akan menyebabkan kedalaman akuifer semakin dangkal. Meningkatnya kecepatan infiltrasi akan meningkatkan jumlah air tanah, sehingga akan mengurangi kedalaman akuifer.

6. Geofisik (kedalaman akuifer) berpengaruh negatif terhadap debit mata air dengan koefisien *inner weight* sebesar -0,282. Hal ini menunjukkan semakin dangkal akuifer, maka debit mata air semakin besar. Pada akuifer dangkal, jarak yang ditempuh oleh air dari daerah resapan ke akuifer semakin dekat, sehingga debit semakin besar.

Selanjutnya, dilakukan pengujian pengaruh tidak langsung. Koefisien pengaruh tidak langsung diperoleh dari hasil kali antara kedua pengaruh tidak langsung. Misalkan pengaruh tidak langsung antara Curah Hujan terhadap Karakteristik vegetasi melalui Lahan, koefisien sebesar $0,175 \times 0,982 = 0,172$.

Karena kedua pengaruh langsung (Curah Hujan terhadap Lahan tidak signifikan, dan Lahan terhadap Karakteristik vegetasi signifikan), maka pengaruh tidak langsung antara Curah Hujan terhadap Karakteristik vegetasi tidak signifikan. Pengaruh tidak langsung Curah Hujan terhadap Biofisik tanah diperoleh dari hasil perkalian koefisien pengaruh Curah Hujan terhadap Lahan, koefisien pengaruh Lahan terhadap Karakteristik vegetasi dan koefisien pengaruh Karakteristik

vegetasi terhadap Biofisik tanah. Demikian seterusnya, hasil pengujian pengaruh langsung (PL) dan tidak langsung (PTL) selengkapnya terdapat pada Tabel 24.

Tabel 24. Hasil Pengujian Hipotesis dalam *Inner Model* (Pengaruh langsung dan tidak langsung)

Hubungan	Pengaruh	Koefisien	Keterangan
C->L	PL	0,131	Tidak Signifikan
C->L->K	PTL	0,172	Tidak Signifikan
L->K	PL	0,982	Signifikan
C->L->K->B	PTL	0,132	Tidak Signifikan
L->K->B	PTL	0,757	Signifikan
K->B	PL	0,771	Signifikan
C->L->K->B->H	PTL	0,036	Tidak Signifikan
L->K->B->H	PTL	0,207	Signifikan
K->B->H	PTL	-1,136	Signifikan
B->H	PL	0,273	Signifikan
C->L->K->B->H->G	PTL	-0,012	Tidak Signifikan
L->K->B->H->G	PTL	0,020	Signifikan
K->B->H->G	PTL	-0,072	Signifikan
B->H->G	PTL	-0,093	Signifikan
H->G	PL	-0,342	Signifikan
C->L->K->B->H->G->D	PTL	0,004	Tidak Signifikan
L->K->B->H->G->D	PTL	0,020	Signifikan
K->B->H->G->D	PTL	0,02	Signifikan
B->H->G->D	PTL	0,026	Signifikan
H->G->D	PTL	0,096	Signifikan
G->D	PL	-0,282	Signifikan

Keterangan : C : Curah hujan, L: Lahan, K: Karakteristik vegetasi, B: Biofisik Tanah, H: Hidrologi, G: Geofisik, D: Debit, PL: Pengaruh Langsung; PTL: Pengaruh Tidak Langsung

Berdasar hasil model tersebut, maka maksimalisasi debit mata air dapat dilakukan dengan jalan:

1. Minimalisasi kedalaman akuifer (Geofisik) yang dipengaruhi negatif oleh kecepatan infiltrasi (Hidrologi)
2. Maksimalisasi kecepatan infiltrasi (Hidrologi) yang dipengaruhi positif oleh C-organik (Biofisik tanah), tetapi dipengaruhi negatif oleh kerapatan belta (Karakteristik vegetasi)
3. Maksimalisasi C-organik tanah (Biofisik tanah) yang dipengaruhi positif oleh kerapatan belta (Karakteristik vegetasi)



4. Optimalisasi kerapatan belta (Karakteristik vegetasi) yang dipengaruhi positif oleh luas daerah resapan (Lahan)

7.3.2. Hasil optimalisasi debit mata air dan karakteristik daerah resapan dengan Analisis *Response Surface*

7.3.2.1. Optimalisasi Debit mata air

Kedalaman akuifer (Geofisik) berpengaruh negatif terhadap debit mata air. Hasil *output* analisis *Response Surface* kedalaman akuifer (Geofisik) untuk optimalisasi Debit mata air selengkapnya terdapat pada Lampiran 5. Berdasarkan hasil analisis, model *Response Surface* optimalisasi Debit mata air adalah sebagai berikut:

$$\hat{D} = -0,093 \text{ G.KD} + 0,298 \text{ G.KD}^2 + e$$

Dimana \hat{D} : perkiraan optimalisasi Debit mata air; G.KD: Kedalaman akuifer (Geofisik); e : error

Untuk mendapatkan debit mata air yang maksimal sebesar 0,48 l.detik⁻¹, maka kedalaman akuifer (Geofisik) harus mencapai 0,93 m. Sedangkan debit mata air minimal yaitu 0,11 l.detik⁻¹ terjadi pada kedalaman akuifer sebesar 1,33 m.

7.3.2.2. Optimalisasi Kedalaman Akuifer (Geofisik)

Kecepatan infiltrasi (Hidrologi) berpengaruh negatif terhadap kedalaman akuifer (Geofisik). Analisis *Response Surface* antara kedua variabel tersebut terdapat pada Lampiran 6. Model *Response Surface* optimalisasi kedalaman akuifer (Geofisik) adalah sebagai berikut:

$$\hat{G} \text{ KD} = -1,190 \text{ H.KI} + 4,544 \text{ H.KI}^2 + e$$

Dimana \hat{G} : nilai perkiraan optimalisasi Kedalaman akuifer (Geofisik); H.KI : Kecepatan Infiltrasi (Hidrologi) dan e : error

Untuk memperoleh kedalaman akuifer (Geofisik) minimal sebesar 0,91 m dibutuhkan kecepatan infiltrasi (Hidrologi) sebesar 51,16 cm.jam⁻¹. Sedangkan kedalaman akuifer terdalam sebesar 1,46 m akan terjadi, jika kecepatan infiltrasi (Hidrologi) sebesar 39,6 cm.jam⁻¹.



7.3.2.3 Optimalisasi Kecepatan Infiltrasi (Hidrologi)

Kerapatan belta (Karakteristik vegetasi) berpengaruh negatif terhadap kecepatan infiltrasi (Hidrologi). Akan tetapi C-organik tanah (Biofisik tanah) berpengaruh positif terhadap kecepatan infiltrasi (Hidrologi). Hasil analisis *Response Surface* ketiga variabel tersebut terdapat pada Lampiran 7. Model *Response Surface* optimalisasi Hidrologi adalah sebagai berikut:

$$\hat{H}_{KI} = -9,106 K.KRB + 7,442 B.CO + e$$

Dimana \hat{H}_{KI} : nilai perkiraan optimalisasi kecepatan infiltrasi (Hidrologi); K.KRB: Kerapatan Belta (Karakteristik vegetasi); B.CO: C-organik tanah (Biofisik tanah) dan e : error

Agar kecepatan infiltrasi maksimal sebesar $51,16 \text{ cm.jam}^{-1}$, maka kerapatan belta hanya sebesar 76.757 individu per 24,48 ha dengan kandungan C-organik sebesar 0,85 % . Sedangkan kecepatan infiltrasi minimal sebesar $39,6 \text{ cm.jam}^{-1}$ terjadi jika kerapatan belta sebesar 126.202 individu per 38,37 ha dan kandungan C-Organik sebesar 0,72 % .

7.3.2.4. Optimalisasi C-organik (Biofisik Tanah)

Kerapatan belta (Karakteristik vegetasi) berpengaruh positif terhadap C-organik tanah (Biofisik tanah). Analisis *Response Surface* antara kerapatan belta dengan C-organik tanah menghasilkan *output* seperti terdapat pada Lampiran 8. Model *Response Surface* optimalisasi C-organik adalah sebagai berikut:

$$\hat{B}_{CO} = 0,065 K.KRB + 0,22774 K.KRB^2 + e$$

Dimana \hat{B}_{CO} : nilai perkiraan optimalisasi C organik tanah (Biofisik Tanah); K.KRB : Kerapatan Belta (Karakteristik vegetasi) dan e : error

Kandungan C-organik tertinggi sebesar 0,98% akan dicapai pada kerapatan belta sebanyak 295.456 individu per 128,56 ha. Sedangkan kandungan C-organik terendah sebesar 0,72 % diperoleh pada kerapatan belta sebesar 126.202 individu per 38,37 ha.



7.3.2.5. Optimalisasi Kerapatan Belta (Karakteristik vegetasi)

Luas daerah resapan mata air berpengaruh positif terhadap kerapatan belta. Hasil *output* analisis kerapatan belta dengan luas daerah resapan terdapat pada Lampiran 9. Model *Response Surface* optimalisasi kerapatan belta adalah sebagai berikut:

$$\hat{K}_{.KRB} = 109350 L.LS - 43795 L.LS^2 + e$$

Dimana \hat{K} : nilai duga optimalisasi Kerapatan Belta (Karakteristik vegetasi); L. LS : Luas daerah resapan (Lahan) dan e: error.

Untuk memperoleh kerapatan belta maksimal sebesar 295.456 individu per daerah resapan diperoleh dari daerah resapan seluas 128,56 ha. Kerapatan belta minimal sebesar 76.757 individu per daerah resapan diperoleh dari daerah resapan seluas 24,48 ha.

7.3.3. Maksimalisasi debit mata air berdasarkan optimalisasi karakteristik daerah resapan

Berdasarkan hasil hubungan variabel dalam model PLS dan analisis *Response Surface* maka upaya maksimalisasi debit mata air dapat dilakukan.

Hasil analisis *Response Surface* menunjukkan debit tertinggi tercapai sebesar $0,48 \text{ l.detik}^{-1}$ pada akuifer dengan kedalaman 0,93. Hal ini berarti agar debit dapat maksimal maka dilakukan minimalisasi kedalaman akuifer (Geofisik) sampai sedalam 0,93 m. Agar kedalaman akuifer tetap dangkal diperlukan maksimalisasi kecepatan infiltrasi hingga $51,16 \text{ cm.jam}^{-1}$ dan diupayakan tidak terjadi kecepatan infiltrasi minimal sebesar $39,6 \text{ cm.jam}^{-1}$. Maksimalisasi kecepatan infiltrasi dilakukan dengan mempertahankan C-organik tertinggi sebesar 0,98% dan meminimalkan kerapatan belta hingga 76.757 individu per daerah resapan.



7.4. KESIMPULAN

1. Hasil model PLS menunjukkan beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk memaksimalkan debit yaitu :

- Minimalisasi kedalaman akuifer (Geofisik) yang dipengaruhi negatif oleh kecepatan infiltrasi (Hidrologi)
- Maksimalisasi kecepatan infiltrasi (Hidrologi) yang dipengaruhi positif oleh C-organik (Biofisik tanah), tetapi dipengaruhi negatif oleh kerapatan belta (Karakteristik vegetasi)
- Maksimalisasi C-organik tanah (Biofisik tanah) yang dipengaruhi positif oleh kerapatan belta (Karakteristik vegetasi)
- Optimalisasi kerapatan belta (Karakteristik vegetasi) yang dipengaruhi positif oleh luas daerah resapan (Lahan)

2. Debit mata air maksimal sebesar $0,48 \text{ l.detik}^{-1}$ akan tercapai pada kedalaman akuifer $0,93 \text{ m}$. Kedalaman akuifer tersebut diperoleh dari kecepatan infiltrasi maksimal sebesar $51,16 \text{ cm.jam}^{-1}$. Maksimalisasi kecepatan infiltrasi dilakukan dengan mempertahankan C-organik tertinggi sebesar $0,98\%$ dan meminimalkan kerapatan belta hingga $76.757 \text{ individu per } 24,48 \text{ ha}$.

VIII. PEMBAHASAN UMUM

Mata air Krisik menghasilkan rata-rata debit per bulannya terbesar (0,46 l.detik⁻¹) dibandingkan mata air Complang (0,3 l.detik⁻¹) dan Pusung Pegat (0,11 l.detik⁻¹) (Tabel 25). Besarnya debit mata air Krisik didukung oleh letak akuifernya lebih dangkal dibandingkan akuifer dua mata air lainnya, sehingga jarak akuifer dengan permukaan tanah lebih dekat dan debit menjadi lebih besar.

Selain itu, mata air Krisik bisa menghasilkan fluktuasi debit yang tidak sebesar fluktuasi debit mata air Complang dan Pusung Pegat karena airnya mengalir sepanjang tahun. Sedangkan mata air Complang mengalami pengeringan selama 1 bulan dan mata air Pusung Pegat mengering selama 4 bulan pada periode Juli 2009 – Juni 2010.

Jika dihubungkan dengan luas daerah resapan, mata air Krisik memiliki daerah resapan paling sempit sebesar 24,48 ha, namun menghasilkan debit paling besar (Tabel 25). Menurut Todd *and* Mays (2005) besarnya debit mata air ditentukan oleh luas daerah resapan. Besarnya debit mata air Krisik dapat dikaitkan dengan biofisik tanah di daerah resapannya. Mata air Krisik memiliki biofisik tanah hampir sama dengan mata air Pusung Pegat, tetapi lebih baik dari mata air Complang. Meskipun C organik di mata air Krisik lebih rendah dari Pusung Pegat, akan tetapi BI tanah Krisik lebih rendah dan porositasnya lebih tinggi dibandingkan Pusung Pegat dan Complang. Ditambah lagi KHJ mata air Krisik masih tergolong sangat cepat. Pada tanah dengan BI rendah, porositas tinggi dan KHJ sangat cepat, diharapkan jumlah curah hujan yang masuk ke dalam tanah lebih banyak karena infiltrasi berlangsung cepat.

Besarnya debit mata air Krisik dibandingkan dengan dua mata air lainnya dapat dikaitkan juga dengan karakteristik vegetasi di daerah resapan mata air ini. Mata air Krisik memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas tertinggi (0,51). Selain itu, lebih dari 60% daerah resapan mata air ini ditutupi oleh vegetasi dan tidak ada SPL pemukiman. Persentase penutupan kanopi (*plant cover*) yang tinggi efektif berperan dalam mengontrol erosi, karena kanopi menyerap energi kinetik yang dihasilkan butiran hujan, menutupi sebagian besar tanah ketika curah hujan tinggi, mengurangi aliran permukaan dan memelihara porositas permukaan tanah

(Zhang *et al.*, 2005). Sedangkan mata air Pusung Pegat memiliki Indeks Kualitas Biodiversitas terendah (0,36) dan penutupan kanopi kurang dari 50% akibat adanya SPL Pemukiman dan Hortikultura/sawah. Ketiga daerah resapan mata air ini didominasi oleh jenis pohon dan belta tanaman budidaya (tanaman introduksi). Pinus (*P. merkusii*) mendominasi jenis pohon di daerah resapan mata air Krisik dan Pusung Pegat dengan INP masing-masing 66,80% dan 65,80%. Kemudian diikuti dengan durian (*Durio zibethinus*) dan sengon laut (*A. falcataria*) yang juga mendominasi kedua daerah resapan mata air. Sedangkan daerah mata air Complang didominasi oleh durian (*D. zibethinus*) dengan INP nya mencapai 25,97%. Diikuti kemudian oleh kelapa (*C. nucifera*), sengon laut (*A. falcataria*) dan petai (*Parkia speciosa*) dengan INP berturut-turut 23,28%, 20,59%, 9,30%. Kopi robusta (*C. canephora* var. *robusta*) merupakan jenis belta yang mendominasi ketiga daerah resapan mata air dengan INP hampir sama, yaitu Krisik (53,91 %), Complang (50,44 %) dan Pusung Pegat (48,71%). Jenis belta lainnya yang mendominasi adalah sengon laut (*A. falcataria*), kopi asisa (*C. liberica*) dan pisang (*M. paradisiaca*). Nampaknya jenis-jenis vegetasi ini ikut berperan dalam menentukan besarnya debit. Hal ini ditunjukkan dalam model *PLS*, dimana kerapatan belta mempunyai pengaruh paling kuat terhadap debit mata air, meskipun pengaruhnya negatif. Pengaruh negatif ini disebabkan dominansi kopi robusta (*C. canephora* var. *robusta*) dan sengon laut (*A. falcataria*) di daerah resapan. Pada kerapatan tinggi, daun kopi menjadi lebih lebar dan tipis, stomata terbuka lebih banyak, sehingga potensial *hydric* meningkat dan transpirasi juga meningkat (Righi *et al.*, 2008). Van Kanten and Vaast (2006) menyatakan umumnya tanaman kopi memiliki konsumsi air harian per hektar lebih tinggi di bawah naungan dari pada di tempat terbuka karena pertumbuhan vegetatif kopi lebih tinggi di naungan. Kopi memiliki transpirasi harian minimum dan maksimum lebih tinggi dibandingkan tanaman penanungnya. Transpirasi harian minimum dan maksimum kopi adalah 0,74 dan 4,08 mm, sedangkan *Eucalyptus deglupta* sebesar 0,35 dan 1,06 mm, *Terminalia ivorensis* sebesar 0,70 dan 2,10 mm dan *Erythrina poeppigiana* sebesar 0,13 dan 0,79 mm. Estimasi transpirasi air tahunan dikombinasikan dengan kopi dan pohon peneduh adalah 20-250% lebih tinggi dari kopi yang ditanam di bawah sinar matahari

peny. Sengon (*A.falcataria*) merupakan *fast growing species*, yang juga mengalami transpirasi tinggi.

Tabel 25. Karakteristik Lahan, biogeohidrofisik dan vegetasi daerah resapan mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat

No.	Karakteristik Daerah resapan	Mata air		
		Krisik	Complang	Pusung Pegat
1	Debit rata2 per bulan (l.detik-1)	0,46	0,3	0,1
	fluktuasi	mengalir terus	mengering 1 bulan	mengering 4 bulan
2	Lahan Luas daerah resapan (ha)	24,48	38,37	128,56
	lereng (%)	18	14	12
3	Geofisik (akuifer)			
	Kedalaman (m)	0,93	1,46	1,33
	Ketebalan (m)	12,59	2,99	1,96
4	Biofisik tanah			
	C-organik (%)	0,85	1,05	0,98
	Bl ($g.cm^{-3}$)	1,25	1,37	1,47
	Pasir (%)	47,70	43,46	49,82
	Debu (%)	29,21	29,22	30,13
	Liat (%)	22,93	25,35	21,52
	Porositas (%)	49,10	39,46	41,17
	Kemantapan agregat (mm)	2,78	1,35	3,28
5	KHU ($cm.jam^{-1}$)	30,92	11,75	66,81
		(sangat cepat)	(cepat)	(sangat cepat)
5	Vegetasi			
	Indeks Kualitas Biodiversitas	0,51	0,47	0,36
	Penutupan kanopi (%)	63,8	45,72	42,89
	Kerapatan pohon (indv/ daerah resapan)	1733	2818	5255
	Kerapatan belta (indv/ daerah resapan)	76757	126202	295456
	Kerapatan tumbuhan bawah (indv/ daerah resapan)	27640563	14392738	65258578
	C-stock ($Mg.ha^{-1}$)	1619,72	1617,72	6837,29
6	Hidrologi			
	Kecepatan Infiltrasi ($cm.jam^{-1}$)	51,16	39,60	40,39
		(sangat cepat)	(sangat cepat)	(sangat cepat)
	Simpanan air tanah (mm)	90,88	66,14	23,37

Besarnya debit di mata air Krisik disebabkan daerah ini memiliki kecepatan infiltrasi yang tergolong sangat cepat (Tabel 25.). Disamping itu, selisih simpanan air tanah di musim kemarau dan hujan paling besar dibandingkan dua mata air lainnya. Hal ini menunjukkan daerah resapan mata air Krisik memiliki kemampuan menyimpan air lebih tinggi dibandingkan dua mata air lainnya.



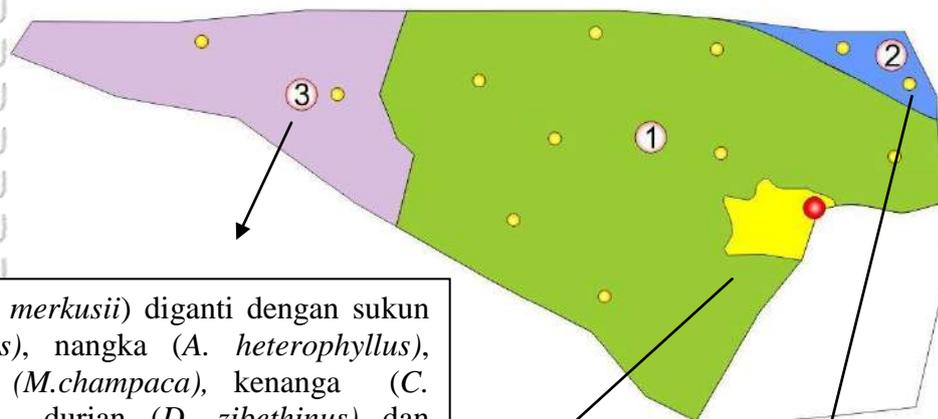
Maksimalisasi debit mata air sebesar $0,48 \text{ l.detik}^{-1}$ akan tercapai pada kedalaman akuifer $0,93 \text{ m}$. Kedalaman akuifer tersebut diperoleh dari kecepatan infiltrasi maksimal sebesar $51,16 \text{ cm.jam}^{-1}$. Kecepatan infiltrasi dipengaruhi positif oleh C-organik tanah, namun dipengaruhi negatif oleh kerapatan belta. Hasil analisis *Response Surface* menunjukkan maksimalisasi kecepatan infiltrasi dilakukan dengan mempertahankan C-organik tertinggi sebesar $0,98\%$ dan meminimalkan kerapatan belta hingga 76.757 individu per $24,48 \text{ ha}$.

Upaya penambahan C-organik bisa dilakukan dengan meningkatkan diversitas tanaman lokal yang bernilai ekologi dan ekonomi, seperti sukun (*Artocarpus altilis*), nangka (*A. heterophyllus*), cempaka (*Michelia champaca*), kemiri (*Aleurites moluccana*) dan jenis-jenis bambu (Soejono *et al.*, 2011). Selain itu perlu diperhatikan penanaman jenis-jenis yang memiliki kecepatan lapuk seresah yang berbeda, sehingga selain menambah hara seresah juga bisa berfungsi melindungi tanah dari pukulan air hujan. Tanaman dari famili Fabaceae (polong-polongan) umumnya memiliki seresah cepat lapuk. Tanaman jengkol (*Pithecellobium jiringa*) dan alpokat (*Persea americana*) memiliki seresah dengan pelapukan sedang (Hairiah *et al.*, 2004). Di bawah pohon cempaka (*M. champaca*), BOT dan N tersedia dapat ditingkatkan menjadi berturut-turut $40-50\%$ dan $6-14\%$ pada tanah dengan kedalaman $1-20 \text{ cm}$ selama periode 6 tahun (Puri and Panwar, 2007). Dapat dipertimbangkan juga dua jenis pohon buah yang menghasilkan seresah banyak dan berbeda kecepatan dekomposisinya, yaitu kreco (*Diospyros malabarica*) dan jambu air (*Syzigium javanicum*). Kreco (*D. malabarica*) menghasilkan seresah yang cepat lapuk, dalam waktu 88 hari seresahnya sudah terdekomposisi. Sedangkan jambu air (*S. javanicum*) menghasilkan seresah lambat lapuk, seresah tanaman ini membutuhkan waktu dekomposisi hingga 317 hari (Rindyastuti dan Fiqa, 2011). Jenis-jenis bambu selain daunnya lambat lapuk (sebagai pelindung tanah), juga dapat menambah resapan air ke dalam tanah. Hutan bambu memiliki kecepatan infiltrasi lebih tinggi daripada hutan terganggu di Ngantang (Saputra, 2008). Pada hutan bambu, air tidak hanya bergerak secara vertikal tetapi juga secara horisontal. Sebaran akar bambu yang terkonsentrasi pada kedalaman 30 cm dan berkurang pada

kedalaman > 30 cm diduga yang menyebabkan air bergerak horisontal dan keluar sebagai mata air.

Penghijauan terprogram dengan melakukan optimalisasi kerapatan belta di masing-masing daerah resapan mata air perlu dilakukan, yaitu dengan (Gambar 71):

- Penggantian pohon pinus (*P. merkusii*) dan sengon (*A. falcataria*) di daerah resapan mata air Krisik dan Pusung pegat dengan jenis-jenis pohon alternatif seperti sukun (*A. altilis*), angka (*A. heterophyllus*), cempaka (*M. champaca*), kemiri (*A. moluccana*) dan jenis-jenis bambu
- Penghijauan pohon jambu-jambuan (*Syzigium spp.*), langsep (*Lansium domesticum*), kreco (*D. malabarica*) dan jenis pohon buah lainnya di kawasan pemukiman.
- Pengurangan kerapatan kopi (*C. canephora*) di ketiga daerah resapan mata air.



Pinus (*P. merkusii*) diganti dengan sukun (*A. altilis*), angka (*A. heterophyllus*), cempaka (*M. champaca*), kenanga (*C. odorata*), durian (*D. zibethinus*) dan bambu

SPL Kopi multistrata ditambah keragamannya dengan jenis-jenis sukun (*A. altilis*), angka (*A. heterophyllus*), cempaka (*M. champaca*), kenanga (*C. odorata*), durian (*D. zibethinus*) dan bambu

SPL Kebun campuran ditambah tutupan lahannya dan diperluas SPLnya dengan tanaman sukun (*A. altilis*), angka (*A. heterophyllus*), cempaka (*M. champaca*), kenanga (*C. odorata*), durian (*D. zibethinus*) dan bambu

Gambar 71. Rancangan Penghijauan di Daerah Resapan Mata air Krisik

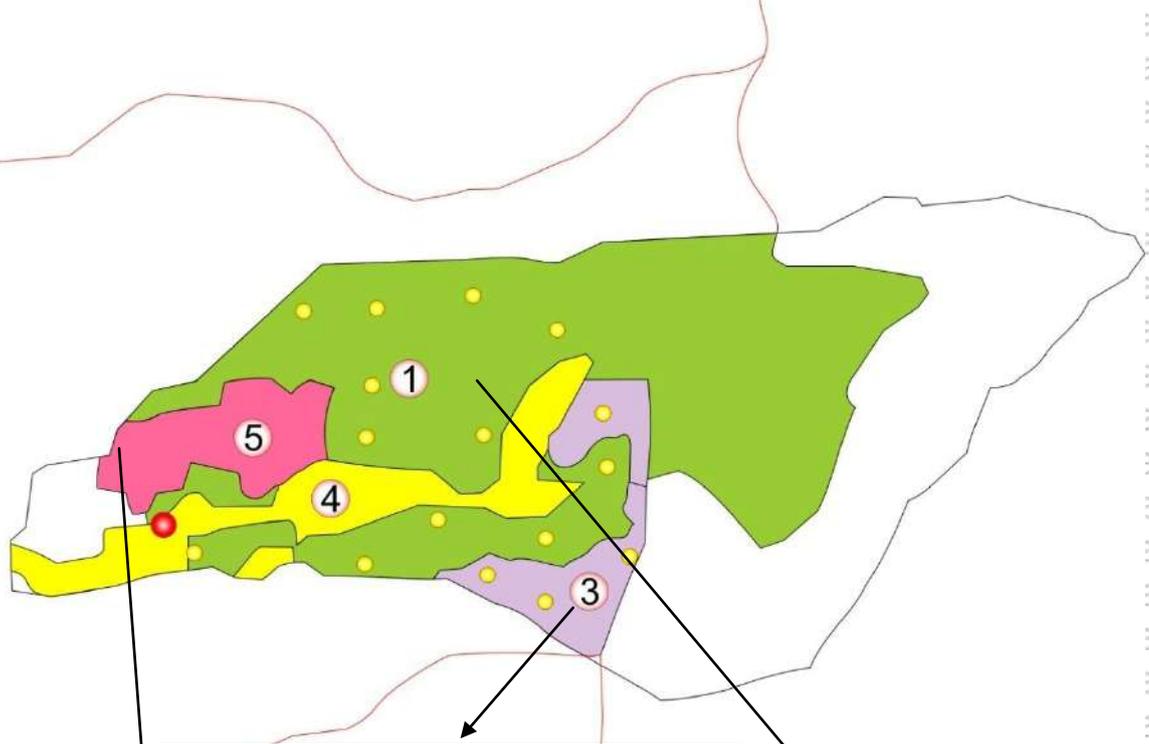


Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

Repository
Repository
Repository

Reposit
Reposit
Reposit



Pinus (*P. merkusii*) diganti dengan sukun (*A. altilis*), nangka (*A. heterophyllus*), cempaka (*M.champaca*), kenanga (*C. odorata*), durian (*D. zibethinus*) dan bambu

SPL Pemukiman dihijaukan dengan pohon jambu-jambuan (*Syzigium spp.*), langsep (*L. domesticum*), kreco (*D. malabarica*) dan jenis pohon buah lainnya.

SPL Kopi multistrata ditambah keragamannya dengan jenis-jenis sukun (*A. altilis*), nangka (*A. heterophyllus*), cempaka (*M.champaca*), kenanga (*C. odorata*), durian (*D. zibethinus*) dan bambu.

Gambar 73. Rancangan Penghijauan di Daerah Resapan Mata air Pusung Pegat



IX. KESIMPULAN DAN SARAN

9.1. KESIMPULAN

1. Hasil karakterisasi mata air Krisik, Complang dan Pusung Pegat menunjukkan bahwa ketiga mata air merupakan jenis mata air kontak, mempunyai akuifer dangkal, yang terdiri dari batu pasir yang tidak terkonsolidasi.
2. Daerah resapan mata air Krisik memiliki kedalaman akuifer paling dangkal, biofisik tanah paling baik (BI dan porositas tinggi, KHJ sangat cepat), sehingga rata-rata debit per bulannya paling tinggi dibandingkan debit mata air Complang dan Pusung pegat. Disamping itu indeks kualitas biodiversitas dan penutupan kanopi mata air Krisik juga paling tinggi di antara ketiga mata air tersebut.
3. Karakteristik Vegetasi, Geofisik, Biofisik tanah, Lahan dan Hidrologi secara nyata mempengaruhi debit mata air. Karakteristik vegetasi (Kerapatan belta) merupakan variabel yang paling berpengaruh nyata terhadap debit mata air.
4. Maksimalisasi debit mata air sebesar $0,48 \text{ l.detik}^{-1}$ akan tercapai pada kedalaman akuifer $0,93 \text{ m}$. Kedalaman akuifer tersebut diperoleh dari kecepatan infiltrasi maksimal sebesar $51,16 \text{ cm.jam}^{-1}$. Maksimalisasi kecepatan infiltrasi dilakukan dengan mempertahankan C-organik tertinggi sebesar $0,98\%$ dan meminimalkan kerapatan belta hingga 76.757 individu per $24,48 \text{ ha}$.

9.2. SARAN:

Perlu dilakukan penelitian lanjutan terhadap debit, karakteristik biogeohidrofisik dan vegetasi di daerah resapan ketiga mata air guna memperoleh data time series, sehingga variasi data menjadi lebih tinggi. Dalam penelitian lanjutan tersebut hanya digunakan indikator-indikator yang mewakili, seperti kerapatan belta, C-organik tanah dan kecepatan infiltrasi. Disamping itu juga, perlu diperhatikan aspek transpirasi vegetasi, karena diduga transpirasi yang terjadi di daerah resapan mempengaruhi besarnya debit mata air.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous (a). 2007. National Action Plan (NAP) Addressing Climate Change. State Ministry of Environment, Jakarta.
- Anonymous (b). 2007. Laporan Inventarisasi Sumber-sumber Air di Kabupaten Malang. Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Kabupaten Malang (tidak dipublikasikan).
- Anonymous. 1984. Tanah dan Keadaan Tanah di DAS Kali Konto Hulu, Jawa Timur. NUFFIC-UNIBRAW Soil Science Project. Soil Science Departement Universitas Brawijaya. Malang.
- Anonymous. 2004. The Global Water Crisis. <http://www.savewater.com.au/default.asp?SectionId=5&SortTag=269>, tanggal akses 15 Januari 2007.
- Ardina, P. 1985. Hubungan antara Litologi dan Luah di Pulau Jawa. *Skripsi*. Fakultas Geografi. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Arisoesilaningsih, E., S. Indriyani, R. Retnowati, A.A.R. Fernandes. 2010. Pemodelan Pertumbuhan Umbi *Amorphophallus onchophyllus* pada Beberapa Agroforestri di Jawa Timur Menggunakan Program *Smart PLS*. 7th Basic Science National Seminar Proceeding. Malang.
- Arrijani. 2006. Korelasi Model Arsitektur Pohon dengan Laju Aliran Batang, Curahan Tajuk, Infiltrasi, Aliran Permukaan dan Erosi. Disertasi. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Arsyad, S. 2000. *Konservasi Tanah dan Air*. Cetakan Ketiga. Institut Pertanian Bogor Press, Bogor.
- Asdak, C. 2004. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Azan, S., L.M. Hutasoit, A.M. Ramdhan. 2006. Penentuan Daerah Resapan Sumber Mataair Daerah Sibolangit, Sumatra Utara. *Jurnal GeoAplika* 1(1): 15-30
- Barbour, G.M., J.K. Burk, and W.D. Pitts. 1987. *Terrestrial Plant Ecology*. Los Angeles: The Benyamin/Cummings Publishing Company. Inc.
- Barthlott, W., J. Mutke and G. Kier. 1999. BIOMAPS – Biodiversity Mapping for Protection and Sustainable Use of Natural Resources. www.botanik.uni-bonn.de. Tanggal Akses 25 Januari 2009.
- Benyon, R. G., S. Theiveyanathan and T. M. Doddy. 2006. Impacts of tree plantations on groundwater in south-eastern Australia. *Australian Journal of Botany* 54: 181-192.



Brockerhoff, E., H. Jactel, J. Parrotta, C. Quine and J. Sayer. 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation* 17(5): 925-951.

Brown, J., A. Wyers, A. Aldous and L. Bach. 2007. *Groundwater and Biodiversity Conservation: A methods guide for intergrating groundwater needs of ecosystems and species into conservation plant in the Pacific Northwest*. The Nature Conservancy. New Zealand.

Brown, R.H., A.A. Konoplyantsev, J. Ineson and V.S. Kovatevsky. 1972. *Groundwater Studies*. UNESCO.

Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104: 185-228.

Carrow, R.N. and C. Waltz. 1985. *Turfgrass Soil and Water Relationships*. Crop and Soil Science Dept. University of Georgia. Georgia Experiment Station.

Chin. 1997. Overview of the PLS Method. Akses tanggal 13 Juni 2006 dari <http://disc-nt.cba.uh.edu/chin/PLSINTRO.htm>

Cox, G.W. 1997. *Conservation Biology*. Second Ed. Mc. Graw-Hill Companies, Inc. New York. 202-210.

Custovic, H. and Z. Haki. 2003. Water Regime of Some Soils in Herzegovina. *Faculty of Agriculture Sarajevo University* 42 (52): 5-14.

Davis, S.N. and De Wiest. 1966. *Hydrogeology*. John Willey and Sons. New York.

Dewi, W.S. 2007. Dampak alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian: Perubahandiversitas cacing tanah dan fungsinya dalam mempertahankan pori makro tanah. Disertasi. Paskasarjana. Universitas Brawijaya. Malang.

Dierick, D. and Holscher, D. 2009. Species-specific tree water use characteristics in reforestation stands in the Philippines. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (8): 1317-1326.

Englund, J.O. 1986. Spring Characteristics and Hydrological Models of Catchments. *Nordic Hydrology* 17. pp 1-20.

Fiqa, A.P. 2004. Karakter Diversitas Tumbuhan Lokal Berpotensi untuk Konservasi Mata Air berdasarkan Pengetahuan Tradisional Masyarakat di DAS Brantas. Skripsi. Fakultas MIPA. Universitas Brawijaya Malang.

Freeze, R.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 604 pp.



Galas, J. 2005. Human Impact on Physical and Chemical Properties of Springs from Cracow-Czestochowa Upland (Southern Poland). *Polish Journal of Ecology* 3 (53): 329-341.

Ghozali, I. 2005. *Structural Equation Modeling Metode Alternatif Dengan Partial Least Square (PLS)*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang

Hadian M.S.D., U. Murdiana, O. Abdurahman dan M.I. Iman. 2006. Sebaran akuifer dan pola aliran air tanah di Kecamatan Batuceper dan Kecamatan Benda, Kota Tangerang, Propinsi Banten. *Jurnal Geologi Indonesia* 1(3) : 115-128.

Hairiah, K., Widiyanto, S.R. Utami, D. Suprayogo, Sunaryo, S.M. Sitompul, B. Lusiana, R. Mulia, M. Van Noordwijk dan G. Cadisch. 2000. *Pengelolaan Tanah Masam Secara Biologi : Refleksi Pengalaman dari Lampung Utara*. ICRAF-SEA, Bogor. 187 p.

Hairiah, K., Widiyanto, D. Suprayogo, R.H. Widodo, P. Purnomosidhi, S. Rahayu dan M. van Noordwijk. 2004. Ketebalan Seresah sebagai Indikator Daerah Aliran Sungai (DAS) Sehat. *World Agroforestry Centre (ICRAF)*. Bogor.

Hairiah, K., D. Suprayogo, Widiyanto, Berlian, E. Suhara, A. Mardiasuning, R.H. Widodo, C. Prayogo dan S. Rahayu. 2004. Alih guna Lahan hutan menjadi lahan agroforestri berbasis kopi: ketebalan seresah, populasi cacing tanah dan makroporositas tanah. *Agrivita* 26(1):68-80.

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.

Hairiah, K. dan S. Rahayu. 2007. Petunjuk praktis pengukuran karbon tersimpan di berbagai macam penggunaan lahan. *World Agroforestry Centre, ICRAF Southeast Asia*. 77p.

Hairiah, K. dan S. Rahayu. 2010. Mitigasi Perubahan Iklim : Agroforestri kopi untuk mempertahankan cadangan karbon lanskap. Makalah dipresentasikan pada Seminar Kopi 2010. 4-5 Oktober 2010. Bali.

Hamilton, L.S. and P.N. King. 1983. *Tropical Forested Watersheds. Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions*. Westview Press, Boulder, CO, p. 168.

Hanafiah, K.A. 2005. *Dasar-dasar Ilmu Tanah*. PT Raja Grafindo Persada. Jakarta.

Hardjowigeno, S. 1987. *Ilmu Tanah*. PT. Mediyatama Sarana Perkasa, Jakarta.



Heath, R.C. 1994. Ground-Water Recharge in North Carolina. Prepared for the Ground-water Section Division of Environmental Management North Carolina. Department of environment Health and Natural Resources.

Henschke, C. 2005. Groundwater concepts. Fact Sheet No: 55/00. Government South of Australia www.pir.sa.gov.au/factsheets

Hutasoit, L.M. 2003. The Influence of Hydrogeological Factors on Variations of Volcanic Spring Distribution, Spring Discharge and Groundwater Flow Pattern. Buletin Geologi 35(1).

Indriyani, S., E. Arisoesilaningih, T. Wardiyati, H. Purnobasuki, 2011. A model of relationship between climate and soil factors related to axalate content in porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) corm. Biodiversitas. Journal of Biological Diversity. Vol. 12 (1): 45-51.

Indriyanto. 2005. Ekologi Hutan. PT Bumi Aksara. Jakarta

Joshi V.U. and D.T. Tambe. 2010. Estimation of infiltration rate, run-off and sediment yield under simulated rainfall experiments in upper Pravara Basin, India: Effect of slope angle and grass-cover. *J. Earth Syst. Sci.* 119 (6). pp. 763–773.

Kemp, W. M., Boynton, W. R. 2004. Productivity, trophic structure and energy flow in the steady-state ecosystems of Silver Springs, Florida. *Ecological Modelling. article in press.*

Kershaw, K.A. 1973. *Quantitative and Dinamic Plant Ecology*. Second Edition. London: William clowes and sons.

Kurniawan, S., C. Prayogo, Widiyanto, M.T. Zulkarnain, N.D. Lestari, F.K Aini, K. Hairiah. 2010. Estimasi Karbon Tersimpan di Lahan Pertanian di DAS Konto, Jawa Timur. RACSA (Rapid Carbon Stock Appraisal). World Agroforestry Centre. ICRAF Southeast Asia Regional Office. Bogor.

Lakitan, B. 1994. Dasar-dasar Klimatologi. PT Raja Grafindo Persada. Jakarta.

Landon, J.R. 1984. Booker Tropical Soil Manual. Antony Rowe Ltd. Chippenham Wiltshire.

Larcher, W. 1995. Physiological Plant Ecology. Springer Verlag. Berlin.

Lee, R., 1990. Hidrologi Hutan. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.

Lerner, D.N. 1990. Techniques. Groundwater Recharge: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. (Eds. D.N. Lerner, A.S. Issar and I. Simmers). Hannover. Germany. pp 99-299.



Lestariningsih I.D, Widiyanto, D. Suprayogo, K. Hairiah dan M. van Noordwijk. 2007. Pengaruh Alih Guna Lahan Hutan Menjadi Kebun Kopi Terhadap Limpasan Permukaan dan Erosi. Prosiding Kongres Nasional HITI UPN Yogyakarta. Yogyakarta.

Lindenmayer, D.B., J.F. Franklin and J. Fischer. 2006. General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation. *Biological Conservation* 131: 433-445.

Linsley, R.K. dan J.B. Franzini. 1979. Teknik Sumber Daya Air, Edisi 3. Sasongko D., (penerjemah). Penerbit Erlangga. Jakarta.

Linsley, R.K., M.A Kohler dan J.L.H. Pauhlius. 1996. Hidrologi Untuk Insinyur. Penerbit Erlangga. Jakarta.

Lubis, R.F. 2006. Bagaimana Menentukan Daerah Resapan Air Tanah ? INOVASI 6 (18). PPI Jepang.

Ludwig, J.A and Reynolds J.F. 1988. Statistical Ecology, a primer on methods and computing. John Wiley & Sons. New York.

Maestre, F.T., Cortina J., Vallejo R. 2006. Are Ecosystem Composition, Structure, and Functional Status Related to Restoration Success? A Test from Semiarid Mediterranean Steppes. *Restor. Ecol.* 14: 258-266.

Maitre D.C.L, D. F. Scott and C. Colvin. 1999. A Review of Information on Interactions between Vegetation and Groundwater. *Water South of Africa* 25 (2). 137 -152. <http://www.wrc.org.za>.

Malvicini C.F., TS. Steenhuis, M.T. Walter, J.Y. Parlange, M.F. Walter. 2005. Evaluation of spring flow in the uplands of Matalom, Leyte, Philippines. *Advances in Water Resources* 2 .1083-1090.

Manan, S., O. Rusdiana, N.M., Anifjaya, B.Wasis dan Purwowidodo. 1999. Pengaruh Kelas Perusahaan Hutan Pinus (*Pinus Merkusii*) terhadap produksi air : Studi Kasus di KPH Tasikmalaya Perum Perhutani Unit III Jawa Barat. Seminar Pengelolaan Hutan dan Produksi Air Untuk Kelangsungan Pembangunan. Perum Perhutani Bekerjasama dengan Yayasan Institut Manajemen dan Teknologi Kehutanan. Jakarta

Marshall, T.J., J.W. Holmes and C.W. Rose. 1999. Soil Physics. Cambridge University Press. pp 453.

Mauseth, J.D. 1998. Botany: An Introduction to Plant Ecology. Jones and Bartlett Publisher, Inc. Massachusetts.



Misstear, B.D.R. 2000. Groundwater Recharge Assessment: A Key Component of River Basin Manajement. National Hydrology Seminar. Trinity Collage Dublin.

Monde, A., N. Sinukaban, K. Murtiلاكsono dan N.H. Pandjaitan. 2008. Dinamika Kualitas Tanah, Erosi dan Pendapatan Petani Akibat Alih Guna Lahan Hutan menjadi Lahan Kakao di DAS Nopu, Sulawesi Tengah. Forum Pascasarjana 31(3): 215-225.

Muller-Dombois, D. and H. Ellenberg. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley & Sons Inc. New York.

Mulyono, A. 2008. Panduan Perlindungan Sumber Daya Air. Metode Deliniasi-Zonasi dan Sumur Resapan. USAID- Departemen Kehutanan-Bappenas- Environmental Services Program (ESP).

Murdiono, 1972. Penelitian Hidrogeologi di Surakarta-Sragen, Direktorat Geologi, Bandung.

Negi, G.C.S and V. Joshi. 2004. Rainfall and Spring Discharge Patterns in Two Small Drainage Catchments in the Western Himalayan Mountains, India. *The Environmentalist* 24. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, pp 19-28.

Negi, G.C.S and V. Joshi. 2002. Drinking Water Issues and Development of Spring Sanctuaries in a Mountain Watershed in the Indian Himalaya. *Mountain Res. Dev.* : 22(1): 29-31

Onrizal, Ismail, E.A. Perbatakusuma, H. Sudjito. 2008. Struktur Vegetasi dan Simpanan Karbon Hutan Hujan Tropika Primer di Batang Toru, Sumatra Utara. *Jurnal Biologi Indonesia* 5 (2). Bogor. Indonesia.

Pagiola, S., E. Ramírezb, J. Gobbi, C. Haan, M. Ibrahim, E. Murgueitio, J.P. Ruíz. 2007. Paying for the environmental services of silvopastoral practices in Nicaragua.

Poespowardoyo, R.S. 1984. Peta Hidrogeologi Indonesia 1:250.000 Lembar X Kediri (Jawa). Direktorat Geologi Tata Lingkungan. Bandung.

Puradimaja, D. J., D. E. Irawan and L. Hutasoit. 2003. The Influence of Spring Discharge and Groundwater Flow Pattern. *Bulletin of Geology* 35 (1) pp:15 – 23.

Puri, S and P. Panwar. 2007. *Agroforestry: Systems and Practices*. New India Publishing. India.



Puślitanak, 2003. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 2003. *Usahatani pada Lahan Kering*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian, Bogor.

Quinn, G.P. and Keough, M.J. 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, 537 pp.

Rai, S.P., Valdiya, K.S. and Rawat, J.S. (Management of Water Resources: Spring Sanctuaries. In K.S. Valdiya (ed.). *The Khulgad Project: An Experiment in Sustainable Development*. Gyanodaya Prakashan, Nainital, India. Pp. 41-60.

Righi C.A, A.M.P. Lunz, M.S. Bernardes, C. R.Pereira, E. R.Teramoto and J.L. Favarin. 2008. Coffee Water Use In Agroforestry System With Rubber Trees. *R. Ārvore*, Viçosa-MG.32 (4): p.781-792.

Rindyastuti, R. dan A.P.Fiqa. 2011. Dekomposisi dan Pelepasan Hara Dari Serasah *Ficus benjamina*, *Syzygium javanicum* dan *Diospyros Malabarica* Koleksi Kebun RayaPurwodadi. Prosiding Seminar Nasional “*Green Technology For Better Future*”. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim. Malang

Rizal, M.K. 2009. Analisis Pemetaan Zonasi Resapan Air Untuk Kawasan Perlindungan Sumberdaya Air Tanah (*Groundwater*) PDAM Tirtanadi Sibolangit Kabupaten Deli Serdang, Propinsi Sumatera Utara. Tesis.Sekolah Pascasarjana Universitas Sumatera Utara. Medan.

Sada, D.W and K.F. Pohlman. 2006. Draft U.S. National Park Service Mojave Inventory and Monitoring Network Spring Survey Protocols: Level I and Level II. February I.

Sahab, A. 2009. Hubungan Rehabilitasi Lahan dengan Hasil Air (Studi Kasus di Blok S Cipendawa, Desa Megamendung, Kecamatan Megamendung, Kabupaten Bogor, Propinsi Jawa Barat. Skripsi. Program Studi Budidaya Hutan. Departemen Manajemen Hutan. Fakultas Kehutanan. Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Salt, D., D. B. Lindenmayer and R. J. Hobbs. 2004. *Trees and biodiversity: A guide for Farm Forestry*. Rural Industries Research and Development Corporation, Canberra.

Santosa L.W. 2006. Kajian Hidrogeomorfologi Mataair di Sebagian Lereng Barat Gunungapi Lawu. *Forum Geografi*, 20 (1) : 68 – 85.

Santosa, S. dan S. Atmawinata, 1992. *Peta Geologi 1: 250.000 Lembar Malang, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.



Saputra, D.W. 2008. Peran Agroforestri dalam Mempertahankan Laju Infiltrasi Tanah: Pengaruh Pori Makro dan Kemantapan Agregat Tanah terhadap Laju Infiltrasi. Skripsi. Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya. Malang.

Särkkä, J., Levonen, L., Mäkelä, J. 1998. Harpacticoid and cyclopoid fauna of groundwater and springs in southern Finland. *Journal of Marine Systems* 15: 155–161.

Sigonyela V., 2006. Towards understanding the Groundwater Dependent Ecosystems within the Table Mountain Group Aquifer: A conceptual approach. Department of Earth Science.s, Faculty of Natural Sciences, University of the Western Cape. Bellville. Thesis.

Singh, A.K. and R.K. Pande. 1999. Changes in Spring Activity: Experiences of Kumaun Himalaya, India. *The Environmentalist* 9(1): 25-29.

Smith, M.D., Wilcox J.C. and Kelly T. 2004. Dominance not richness determines invasibility of tallgrass prairie. *Oikos* 106: 253-262.

Soedjoko S.A, Suyono dan Darmadi. 1998. Kajian Neraca Air di Hutan Pinus. Makalah Seminar Pengelolaan Hutan dan Produksi Air untuk Kelangsungan Pembangunan, 23 September 1998. Jakarta.

Soejono, S. Budiharta dan E. Arisoelaningsih. 2011. Mengembangkan Model Penghijauan Alternatif pada Kawasan Terdegradasi Dataran Rendah di Sekitar Mata Air. Konggres Ilmu Pengetahuan Nasional X. Jakarta, 8-10 Nopember 2011.

Soerianegara, I. and Lemmens, R.H.M.J. 1993. Plantresources of South-East Asia 5(1): Timber trees:major commercial timbers. Pudoc ScientificPublishers, Wageningen, Netherlands.

Solimun dan A. Rinaldo.2009. Pemodelan Perasmaan Struktural Pendekatan PLS dan SEM Aplikasi Software SmartPLS dan AMOS. Laboratorium Statistika FMIPA Universitas Brawijaya Malang.

Solimun, Nurjannah, Rinaldo, A. 2006. Pemodelan Persamaan Struktural Pendekatan PLS dan SEM Aplikasi Software Smart PLS dan Amos 6. Fakultas MIPA dan Program Pascasarjana Universitas Brawijaya Malang.

Sophocleuous, M. 2003. Groundwater Recharge and water budgets of the KansasHigh Plains and related aquifers. Kansas, USA : Kansas Geological Survey

Sophocleuous, M. and McAllister J.A. 1987. Basinwide water-balance modelling with emphasis on spatial distribution of groundwater recharge. *Water Resources Bulletin* 23, 997 – 1010.



Stanley, W. D., D. B. Jackson, and A.A.R.Aohdy. 1976. Deep Electrical Investigations in the Long Valley geothermal area, California. *Journal of Geophysical Research* 81:810-820.

Stirling G and Wilsey B. 2001. Empirical relationships between species richness, evenness, and proportional diversity. *Am Nat* 158:86–299.

Suharto, E. 2006. Kapasitas Simpanan air Tanah Pada Sistem Tataguna Lahan LPP Tahura Raja Lelo. Bengkulu. *Jurnal Ilmu-ilmu Pertanian Indonesia* 8 (1).

Sumawijaya, N., H. Bekti, D. Suherman dan P. Hartanto. 2006. Air Tanah Dangkal sebagai Sumber Air Bersih Kota Palangkaraya. *Sumber Daya Air dan Lingkungan. Potensi, Degradasi dan Masa Depan*. Lembaga Ilmu pengetahuan Indonesia (LIPI). Bandung.

Suprayogo D, Widiyanto, P. Purnomosidi, R.H. Widodo, F. Rusiana, Z.Z. Aini, N. Khasanah dan Z. Kusuma. 2004. Degradasi Sifat Fisik Tanah Sebagai Akibat Alih Guna Lahan. *Agrivita* 26 (1): 60-68.

Suprayogo D, Sterk G, Sudarto, Utomo W H dan Widiyanto, 2007. Dampak deforestasi terhadap hidrologi tanah di DAS Brantas Hulu, Jawa Timur. *Prosiding Kongres Nasional HITI*. UPN Yogyakarta. 204-224

Susswein, P.M., M. Van Noordwijk. and B. Verbist. 2001. Forest Watershed Functions and Tropical Land Use Change. *In* van Noordwijk, M., S. Williams. dan B. Verbist (Eds.), *Towards integrated natural resource management in forest margins of the humid tropics: local action and global concerns*. International Centre for Research in Agroforestry. Bogor. 28 pp.

Swift, M. 2003. Developing Key Functional Group Approachh Below-ground Biodiversitty Assesment. 11 pp.

Todd, D.K. and L.W. Mays. 2005. *Groundwater Hydrology*. John Willey & Son Inc, Singapore

Tolman, C.F. 1937. *Ground Water*. McGra-Hill. New York.

USDA (The United States Department of Agriculture). 1999. *Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. U.S. Government Printing Office. Washington, DC.

Valdiya, K.S. and S.K Bartarya. 1991. Hydrological Studies of Springs in the Catchment of the Gaula River. *Kumaun Lesser Himalaya*. India. *Mountain Res. And Dev.* 11(3). 239-258.



Van Noordwijk, M. F. Agus, D. Suprayoga, K. Hariyah, G. Pasya, B. Verbist dan Farida. 2004. Peranan Agroforestri dalam Mempertahankan Fungsi Hidrologi DAS. *Agrivita* 26(1): 1-8.

Van Kanten, R. and P. Vaast. 2006. Transpiration of Arabica Coffee and Associated Shade Tree Species in Sub-optimal, Low-altitude Conditions of Costa Rica. *Agroforestry system* Vol. 67 (2) 187-202.

Verbist, B., A.E. Putra dan S. Budidarsono. 2004. Penyebab alih guna lahan dan akibatnya terhadap fungsi Daerah Aliran Sungai (DAS) pada lansekap agroforestri berbasis kopi di Sumatera. *Agrivita* 26(1).

Walton, W.C. 1970. *Groundwater Resource Evaluation*. Mc Graw-Hill Book Company. New York.

Widianto, H. Noveras, D. Suprayogo, R.H. Widodo, P. Purnomosidhi dan M. van Noordwijk. 2004. Konversi Hutan Menjadi Lahan Pertanian : Apakah fungsi hidrologis hutan dapat digantikan sistem kopi monokultur? *Agrivita* 26 (1): 47-52.

Widyatmoko, D. dan Irawati. 2007. *Kamus Istilah Konservasi*. Pusat Konservasi Tumbuhan Kebun Raya Bogor. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Bogor.

Wilsey, B.J. and H.W. Polley. 2002. Reductions in species evenness increase dicot seedling invasion and spittle bug infestation. *Ecol. Lett.* 5: 676-684.

Yulistyarini T., Solikin, A.P. Fiqa dan R. Irawanto. 2009. Evaluasi Keterkaitan Kualitas Vegetasi, Biogeofisik dan Debit Beberapa Mata air Topografi di Malang Raya, Jawa Timur. Kegiatan Program Insentif Bagi Peneliti Dan Perakayasa Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Laporan Akhir (tidak dipublikasikan).

Yulistyarini, T., Solikin, S. Sofiah dan R.A. Laksono. 2009. Karakterisasi Beberapa Mata air di Kota Batu dan Vegetasi di Sekitarnya. *Berkala Penelitian Hayati (Journal of Biological Researches)* Edisi Khusus. No.3A.

Zhang, L., W. R. Dawes and G. R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701-708.

Zhang X.M., Yu X.X., Wu S.H. 2005. Effect of forest vegetation on runoff and sediment production in sloping lands of Loess area. *Frontiers of Forestry in China*. 1(3): 336-342.

Zubaidah, T dan Bulkis, K. 2008. Pemodelan fisika aplikasi metode geolistrik konfigurasi Schlumberger untuk investigasi keberadaan air tanah. *Teknologi Elektro* 7 (1).