DRAFT OKT 2008

DISERTASI

MODEL HIDROGEOLOGI GUNUNGAPI STRATO MENGGUNAKAN TEKNIK PELACAKAN AIR TANAH DI ZONA MATA AIR G. CIREMAI, JAWA BARAT

Oleh:

D. Erwin Irawan

320 05 002

Promotor:

Prof.Dr.Ir. Deny Juanda Puradimaja, DEA

Ko Promotor:

Prof.Dr.Ir. Sudarto Notosiswoyo, M.Eng

Dr.Ir. Prihadi Soemintadiredja

SEKOLAH PASCA SARJANA

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

2008

LEMBAR PERSETUJUAN

DISERTASI

MODEL HIDROGEOLOGI GUNUNGAPI STRATO MENGGUNAKAN TEKNIK PELACAKAN AIR TANAH DI ZONA MATA AIR G. CIREMAI, JAWA BARAT

By:

D. Erwin Irawan .....

32005002

aaa, bbb Oktober 2008

Promotor : Prof.Dr.Ir. Deny Juanda Puradimaja, DEA …….

NIP: 131 414 797

Ko Promotor : Prof.Dr.Ir. Sudarto Notosiswoyo, M.Eng …….

NIP: 130 528 334

Dr.Ir. Prihadi Soemintadiredja …….

NIP: 131 667 756

ABSTRAK

MODEL HIDROGEOLOGI GUNUNGAPI STRATO MENGGUNAKAN TEKNIK PELACAKAN AIR TANAH DI ZONA MATA AIR G. CIREMAI, JAWA BARAT

Oleh

D. Erwin Irawan

NIM : 320 05 002

Ciremai merupakan gunung api strato dengan tinggi 3000 mdpl. Gunung ini terletak di Kabupaten Kuningan dan Majalengka. Zona mata air terletak di bagian kaki dengan jumlah kurang lebih 200 mata air dengan kisaran debit 10 L/s hingga 800 L/s. Tipe mata air umumnya adalah rekahan pada batuan breksi lahar dan lava, serta tipe depresi yang muncul pada tanah pelapukan.

Masalah utama di daerah ini adalah mengkaitkan kawasan imbuhan dengan kawasan pengurasan. Riset ini menggunakan observasi mata air dengan metoda analisis hidrokimia terhadap 7 parameter dan statistik multivariabel Analisis Klaster serta Analisis Komponen Prinsipal terhadap 15 parameter untuk mendapatkan sistem hidrogeologi.

Analisis hidrokimia dengan Diagram Piper memperlihatkan evolusi kimia air tanah dari fasies ion netral di daerah tinggi ke daerah rendah menjadi fasies: a) kation netral–bikarbonat dari penambahan bikarbonat di kawasan imbuhan, b) kalsium–bikarbonat dari kontak dengan batuan kaya plagioklas, c) magnesium–bikarbonat dari kontak dengan batuan gunung api yang bersifat *ferromagnesian*, d) natrium–kalium–klorida dari interaksi dengan batuan sedimen laut. Analisis korelasi antar parameter juga memperlihatkan adanya 2 zona, yakni zona air meteorik dan zona air formasi serta zona transisi diantaranya.

Analisis klaster berhasil mengidentifikasi 4 klaster mata air, yakni: 1) Klaster 1 terdiri dari 5 mata air berjenis mata air hipertermal dengan TDS dan klorida tinggi; 2) Klaster 2 terdiri dari

sub klaster 2a1 terdiri dari 130 mata air berjenis mata air normal dengan komposisi mineral yang seimbang, sub klaster 2a2 terdiri dari 3 mata air berjenis mata air hipertermal yang telah mengalami pengenceran oleh air meteoric, sub klaster 2b terdiri dari 2 mata air berjenis mata air hipertermal dengan TDS tinggi, klorida rendah dan bikarbonat menengah.

Analisis Komponen Prinsipal menunjukkan separasi contoh air tanah yang dikendalikan oleh elevasi pada Kuadran 1 dan debit yang besar karena konduktivitas pada akifer media rekahan pada Kuadran 4. Kedua kuadran tersebut berisi contoh air tanah mesotermal dengan TDS dan ion utama normal hasil interaksi dengan komposisi endapan gunung api. Sebaliknya pada Kuadran 3 terdapat contoh air asin hipertermal yang dikendalikan oleh TDS, EC, dan klorida, sebagai hasil interaksi dengan sedimen laut.

Tiga kasus hidrograf mata air menunjukkan hubungan yang relatif dekat antara debit mata air dengan curah hujan. Hidrograf menunjukkan perkiraan waktu tinggal dalam orde bulanan dengan bentuk tipikal kurva gradual dan tajam. Kurva gradual mencerminkan kendali akifer media pori yang dominan, sementara kurva tajam dikendalikan oleh akifer media rekahan. Hasil lainnya adalah perhitungan kawasan imbuhan dengan luas 3725 km^2 untuk Cibulan dengan volume imbuhan $8{,}2 \times 10^9$ m^3/tahun, 6188 km^2 untuk Telaga Remis dengan volume imbuhan $14{,}5 \times 10^9$ m^3/tahun, dan 22 km^2 untuk Ciuyah dengan volume imbuhan $36{,}9 \times 10^6$ m^3/tahun.

Kata kunci: gunung api strato, analisis hidrokimia, analisis statistik multivariable

Total kata: 428

ABSTRACT

HYDROGEOLOGICAL MODEL OF STRATOVOLCANO USING GROUNDWATER FLOW TRACER BASED ON PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES KIMIA AT MT. CIREMAI'S SPRING ZONE

By

D. Erwin Irawan

NIM : 320 05 002

Ciremai is a 3000 masl strato-volcano. It lies solitarily at Kuningan and Majalengka Regency. The volcano has nearly 200 groundwater springs, discharging 10 L/s to 800 L/s of waters. Main spring types in Ciremai are fractured springs from laharic breccias and lava flow while depression springs originated on weathered soils.

The main problem is to link the recharge areas at upslope with discharge areas at down slope in form of wells and spring belt. This research uses spring observation, hydrochemical analysis on 7 parameters, and multivariate cluster analysis and principal component analysis on 15 parameters to extract the hydrogeological system of Ciremai.

Hydrochemical analysis with Piper Plot presents groundwater evolution from neutral ions at high lands toward low lands in form of: a) neutral cations-bicarbonate from bicarbonate enrichment of recharge area, b) calcium-bicarbonate from interactions with plagioclase rich rocks, c) magnesium-bicarbonate from contact with ferromagnesian volcanic rocks, d) sodium-potassium-chloride from contact with marine sediment. Correlation analysis on the parameters also display 2 zones: meteoric water zone and formation water zone, with transition zone in between.

Four clusters have been identified. Cluster 1 (5 springs) is classified as hyperthermal springs with high TDS, high chloride, moderate bicarbonate, and low sulfate. Cluster 2a1 (130

springs) has normal temperature groundwater. Cluster 2a2 (3 spring).is diluted hyperthermal waters by meteoric waters. The 2b (2 springs) is hyperthermal springs with high TDS, low chloride, moderate bicarbonate, and low sulfate.

PCA identifies groundwater samples with dominant control of elevation on Quadrant 1 and large discharge on Quadrant 4 due to vast fracture system. Both quadrants filled by mesothermic waters with normal TDS and neutral ions. Quadrant 3 is saline hyperthermic waters with anomalous TDS, EC, and Cl, as a results of interactions with marine sediments

The 3 spring's hydrographs show slightly close relationship with rainfall. The estimated time residence of groundwater is with in months period with gradual and sharp typical curves. Gradual curves are controlled by porous aquifer, while the sharp ones are controlled by fractured aquifer. From the graphs, calculated recharge area is 3725 km^2 for Cibulan with $8.2x10^9$ m^3/year of recharge volume, 6188 km^2 for Telaga Remis with $14.5x10^9$ m^3/year of recharge volume, and 22 km^2 for Ciuyah with $36.9x10^6$ m^3/year of recharge volume.

Key word: strato volcano, volcanic hydrogeology, hydrochemical analysis, multivariate analysis

Total words: 371

PERJANJIAN PENGGUNAAN DISERTASI

UCAPAN TERIMAKASIH

Riset ini didanai oleh Institut Teknologi Bandung melalui Dana Riset ITB tahun 2005 dan oleh Dirjen Pendidikan Tinggi melalui dana Hibah Pascasarjana tahun 2005 dan 2006. Saya mengucapkan terimakasih kepada kedua institusi tersebut karena telah dipercaya untuk mengelola dana riset ini.

Saya mengucapkan rasa hormat dan terimakasih kepada tim promotor yang terdiri dari Prof. Deny Juanda Puradimaja, Prof. Sudarto Notosiswoyo, dan Dr. Prihadi Soemintadiredja untuk arahan dan diskusi yang memperkaya riset ini dan untuk menyempurnakan teks disertasi ini. Ketiga promotor juga telah memberi semangat kepada saya untuk terus berupaya lulus tepat waktu dan menulis publikasi dan mengirimkan ke jurnal internasional, hingga menghasilkan 2 naskah yang saat ini masih dalam proses review. Diskusi dan arahan teknis juga saya dapatkan dari Dr. Lilik Eko Widodo, Dr. Thom Bogaard dari TU Delft, serta Dr. Satria Bijaksana.

Saya mengucapkan terimakasih pula untuk Bapak Ukas dan Bapak Wahyu Hidayat dari Bapeda Kab. Kuningan yang telah membantu menyediakan data dan memfasilitasi observasi ke lokasi mata air, Bapak Nana Taryana yang membantu akomodasi saya dan tim. Secara khusus pula, saya berterimakasih kepada tim mahasiswa S1 terdiri dari Sdr. Surya Nugraha, Albertus Ditya, Grandis, Thomas, Ryan Surjaudaja, Aditya Juanda yang telah membantu dalam akuisisi data. Selain itu terimakasih juga saya sampaikan untuk Bapak Taat Setiawan yang telah membantu dalam visualisasi GIS.

Dengan tulus, saya mengucapkan terimakasih untuk istriku Subkhi Dwipa Mahargyani dan matahari kecilku Abraary Raditya Irawan serta keluarga besar yang telah memberikan dukungan moril dan semangat yang tak terukur lagi bagi penulis untuk menyelesaikan riset ini. Disadari bahwa pengorbanan waktu dan tenaga tidak dapat dibayar sepenuhnya dengan selesaikan riset ini. Hanya Allah SWT yang dapat menghitung, menakar, dan memberikan ganjaran pahala bagi Bapak/Ibu yang telah berkontribusi namun tidak dapat disebut satu-persatu.

DAFTAR ISI

ABSTRAK iii
ABSTRACT v
PERJANJIAN PENGGUNAAN DISERTASI vii
UCAPAN TERIMAKASIH viii
DAFTAR ISI x
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xvii
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Distribusi Gunung Api di Indonesia 1
1.2 Pemilihan Daerah Riset 2
1.3 Deskripsi Daerah Riset 3
1.4 Permasalahan 6
1.5 Tujuan 6
1.6 Hipotesis dan Asumsi 7
1.7 Metodologi 8
1.7.1 *Desk Study* 8
1.7.2 Observasi Lapangan 8
1.7.3 Uji Laboratorium 8
1.7.4 Analisis dan Interpretasi 9
1.7.5 Penulisan Disertasi 9
1.8 Output Riset 12
1.9 Catatan 13
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 15
2.1 Geologi 15
2.2 Hidrogeologi 16
2.3 Analisis Kelurusan dan Rekahan 20
2.4 Analisis Sifat Fisik dan Kimia Air Tanah 20
2.4.1 Analisis Grafis 20
2.4.2 Analisis Statistik Multivariabel 21
A. Analisis Komponen Prinsipal (AKP) 22
B. Analisis Klaster (AK) 22

2.5 Evolusi Air Tanah 23
2.6 Analisis Hidrograf Mata Air 24
2.6.1 Umum 24
2.6.2 Hidrograf Debit Mata Air 25
2.6.3 Hidrografi TDS dan Temperatur Air pada Mata Air 29
2.7 Catatan 30
BAB 3 KONDISI REGIONAL CIREMAI 31
3.1 Geologi 31
3.1.1 Kelompok Endapan Vulkanik 31
3.1.2 Kimia Batuan 33
3.1.3 Kelurusan dan Rekahan 34
3.2 Hidrogeologi 39
3.2.1 Data Presipitasi 39
3.2.2 Distribusi Mata Air 44
3.2.3 Geometri Mata Air 48
3.2.4 Survei Geolistrik 53
3.2.5 Debit Mata Air 54
3.2.6 Ketebalan dan Laju Infiltrasi Tanah Pelapukan 55
3.2.7 Kualitas Air Tanah 61
3.2.8 Pola Aliran Air Tanah 61
3.3 Catatan 63
BAB 4 PARAMETER FISIK DAN KIMIA AIR TANAH 65
4.1 Parameter fisik 65
4.1.1 Temperatur 65
4.1.2 Total Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solids*) 66
4.1.3 pH 68
4.2 Parameter kimia 69
4.2.1 Kalsium (Ca^{2+}) 69
4.2.2 Magnesium (Mg^{2+}) 71
4.2.3 Natrium (Na^{+}) 73
4.2.4 Kalium (K^{+}) 75
4.2.5 Klorida (Cl^{-}) 77
4.2.6 Sulfat (SO_4^{2-}) 79

4.2.7 Bikarbonat (HCO_3^-) 81
4.2.8 Fasies Air Tanah 83
4.3 Analisis Korelasi 84
4.3.1 Temperatur vs Elevasi 84
4.3.2 Total Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solids*/TDS) dengan Elemen Utama (Na, K, Cl, SO_4) 87
4.3.3 Klorida (Cl) dengan Sulfat (SO_4) 88
4.3.4 Klorida (Cl) dengan Bikarbonat (HCO_3) 88
4.3.5 Kalium (K) dengan Natrium (Na) 89
4.3.6 Klorida (Cl) dengan Natrium (Na) 90
4.4 Analisis Multivariabel 91
4.4.1 Analisis Klaster (AK) 91
4.4.2 Analisis Komponen Prinsipal (AKP) 94
4.5 Catatan 96
4.5.1 Aplikasi Analisis Klaster dan Analisis Komponen Prinsipal 96
4.5.2 Evolusi Air tanah 97
BAB 5 ANALISIS HIDROGRAF MATA AIR 99
5.2 Mata Air Cibulan 99
5.2.1 Hidrograf Debit Mata Air dengan Curah Hujan 99
5.2.2 Fluktuasi TDS, EC, dan Temperatur 101
5.3 Mata air Telaga Remis 104
5.3.1 Hidrograf Debit Mata Air dengan Curah Hujan 104
5.3.2 Fluktuasi TDS, EC, dan Temperatur 105
5.4 Mata Air Ciuyah 109
5.4.1 Hidrograf Debit Mata Air dengan Curah Hujan 109
5.4.2 Fluktuasi TDS, EC, dan Temperatur 111
5.5 Catatan 113
BAB 6 KESIMPULAN 118
6.1 Sistem Hidrogeologi 118
6.2 Evolusi Air tanah 120
6.3 Originalitas 123
DAFTAR PUSTAKA 125
BIODATA PENULIS 133

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Jalur gunung api aktif di Indonesia, terdiri dari gunung api berumur kuarter (Deptamben 1979 dalam Puradimaja 2006) 1

Gambar 2 Peta lokasi Ciremai dan citra SRTM yang memperlihatkan morfologinya dalam 2D dan 3D. 4

Gambar 3 Bentuk siluet Ciremai yang memperlihatkan perbedaan kemiringan lereng antara bagian utara dan selatan. 5

Gambar 4 Peta jalan riset perioda 2005-2008 11

Gambar 5 Grafik klasifikasi batuan gunung api 33

Gambar 6 Kelurusan of study area 35

Gambar 7 Diagram roset orientasi kelurusan serta jumlahnya. Garis merah menandai kisaran frekuensi kelurusan pada batuan gunung api, yang berpola radia. Kelurusan di luar lingkaran tersebut adalah pada batuan sedimen. 36

Gambar 8 Histogram antara jumlah mata air terhadap jaraknya dengan kelurusan yang terdekat. 36

Gambar 9 Distribusi probabilitas jarak mata air dari kelurusan data (dikelompokkan berdasarkan jenis batuan) 37

Gambar 10 Plot atara debit mata air (Q dalam L/s) dengan jaraknya terhadap kelurusan (dalam m). 37

Gambar 11 Density map of kelurusan. Full circle indicates possible Q-kelurusan korelasi, dashed circle indicates possible no korelasi between Q-kelurusan 38

Gambar 12 Sketsa profil rekahan pada aliran lava dan breksi lahar. 39

Gambar 13 (a) Peta stasiun penakar hujan dan data pengukuran rata-rata bulanan. Peta memperlihatkan stasiun yang ada (titik hitam) dan stasiun yang tersedia datanya (lingkaran merah); (b) Rata-rata hujan bulanan pada stasiun (2006-2007). 41

Gambar 14 (a) Data total hujan tahunan bulan Januari-Desember 2006; (b) Data total hujan tahunan bulan Januari-Juli 2007 43

Gambar 15 Mata air occurrences dan debits zone (Irawan dan Puradimaja, 2006). 44

Gambar 16 Histogram posisi ketinggian mata air 45

Gambar 17 Plot interval elevasi mata air berdasarkan jenis batuan penyusun akifernya 46

Gambar 18 Perbandingan jumlah dan distribusi mata air antara lereng barat (warna hitam) dan lereng timur (warna putih) berdasarkan ketinggian 47

Gambar 19 Penampang geologi Ciremai berarah utara selatan (atas) dan barat-timur (bawah). 48

Gambar 20 Interpretative hydrogeological model of: a) Cibulan Kec. Cilimus, b) Telaga Remis, c) Ciuyah Kec. Ciniru 50

Gambar 21 Interpretative hydrogeological model of: a) Bandorasa Cigandamekar, b) Cibulakan Kec. Cigugur, c) Palutungan Kec. Cigugur, d) Cibitung Kec. Darma, e) Citutupan Majalengka, f) Cileles Majalengka, g) Jero Kaso Majalengka.....53

Gambar 22 Interpretasi survei geolistrik di mata air Cibulan 56

Gambar 23 Interpretasi survei geolistrik di mata air Sangkanurip.....57

Gambar 24 Interpretasi survei geolistrik di mata air Ciuyah.....58

Gambar 25 Histogram debit mata air 59

Gambar 26 Interval plot debit mata air berdasarkan litologi.....59

Gambar 27 Plot interval nilai permeabilitas lapangan. LhB (Breksi lahar), Lv (Lava), PxB (Breksi Piroklastik).....60

Gambar 28 Plot permeabilitas lapangan terhadap elevation. 61

Gambar 29 Pola aliran air tanah di Ciremai (Irawan, 2001) 62

Gambar 30 Pola aliran air tanah pada contoh kasus Cibulan (Irawan, 2001) 63

Gambar 31 Histogram temperatur air tanah 66

Gambar 32 Histogram perbedaan temperatur antara air dan udara 66

Gambar33 Histogram nilai Total Padatan Terlarut (TDS) 67

Gambar 34 Plot interval TDS berdasarkan jenis batuan. Breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw). 68

Gambar 35 Histogram pH.....69

Gambar36 Histogram konsentrasi Ca^{2+} dalam meq/L.....70

Gambar37 Plot interval konsentrasi Ca^{2+} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).....71

Gambar 38 Histogram komposisi Mg^{2+} dalam meq/L 72

Gambar 39 Plot interval konsentrasi Mg^{2+} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).....73

Gambar 40 Histogram komposisi Na^{+} dalam meq/L.....74

Gambar 41 Plot interval konsentrasi Na^{+} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).....75

Gambar 42 Histogram komposisi K^{+} dalam meq/L 76

Gambar 43 Plot interval konsentrasi K^{+} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).....77

Gambar 44 Histogram komposisi Cl^{-} dalam meq/L 78

Gambar 45 Plot interval konsentrasi Cl^{-} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).....79

Gambar 46 Histogram komposisi SO_4^{2-} dalam meq/L 80

Gambar 47 Plot interval konsentrasi SO_4^{2-} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw). 80

Gambar 48 Histogram komposisi HCO_3^- dalam meq/L 81

Gambar 49 Plot interval konsentrasi HCO_3^- (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw). 82

Gambar 50 Plot interval pH berdasarkan jenis batuan: breksi lahars (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastiks (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw). 83

Gambar 51 Plot Piper contoh contoh air tanah dan rekonstruksi proses evolusi kimia airnya 85

Gambar 52 Plot antara elevasi (ELV) dengan temperatur udara (AT) diandai titik hitam, dan temperatur air (WT) ditandai titik merah. 86

Gambar53 Plot TDS dan Na, K, Cl, SO_4 87

Gambar 54 Plot antara ion Cl dan SO_4 88

Gambar 55 Plot antara konsentrasi ion Cl dan HCO_3 89

Gambar 56 Plot antara konsentrasi K dan Na 90

Gambar 57 Scatter plot between Na dan Cl 91

Gambar58 Dendogram of Analisis klaster (Minitab trial version) 93

Gambar 59 Plot komponen prinsipal antara PC 1 dan PC2 95

Gambar 60 Kombinasi fasies air tanah dengan analisis multi variabel dalam proses evolusi air tanah 98

Gambar 61 Plot berurut waktu antara debit mata air (sumbu y kanan) dan presipitasi (sumbu y kiri) di lokasi Mata Air Cibulan 100

Gambar 62 Plot semilog analisis hidrograf debit Mata Air Cibulan 101

Gambar 63 Plot berurut waktu TDS dan EC (sumbu y kanan); dan presipitasi (sumbu y kiri) di lokasi Mata Air Cibulan 102

Gambar 64 Plot hasil pengukuran suhu air dan udara di lokasi Mata Air Cibulan selama 24 jam 104

Gambar 65 Plot berurut waktu antara debit (sumbu y kanan) dan curah hujan (sumber y kiri) di lokasi Mata Air Telaga Remis 106

Gambar 66 Plot semilog analisis hidrograf debit Mata Air Telaga Remis 107

Gambar 67 Plot berurut waktu antara TDS dan EC (sumbu y kanan); dan curah hujan (sumbu y kiri) di lokasi Mata Air Telaga Remis. 108

Gambar 68 Plot berurut waktu hasil pengukuran temperatur air pada mata air dan temperatur udara di Mata Air Telaga Remis 109

Gambar 69 Plot berurut waktu antara debit mata air Ciuyah (sumbu y kanan) dan curah hujan (sumber y kiri). 110

Gambar 70 Plot semilog analisis hidrograf debit Mata Air Ciuyah 111

Gambar 71 Plot berurut waktu antara TDS dan EC (sumbu vertical axis); dan curah hujan (sumbu vertikal kiri) Mata Air Ciuyah. 112

Gambar 72 Plot berurut waktu hasil pengukuran temperatur air pada mata air dan temperatur udara di Mata Air Ciuyah 113

Gambar 73 Usulan model hidrograf mata air pada sistem akifer G. Ciremai (a) dan (b) dan model hidrograf sistem akifer media rekahan (c) 116

Gambar 74 Skematik evolusi air tanah berdasarkan fasies air tanah 122

Gambar 75 Skematik sistem hidrogeologi berdasarkan sifat fisik dan kimia air 123

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Jumlah dan distribusi gunung api Tipe A di Indonesia 2

Tabel 2 Distribusi 35 gunung api aktif di P.Jawa (Deptamben 1979)..... 2

Tabel 3 Ringkasan kondisi hidrogeologi G. Ciremai, G. Tangkubanparahu, G. Gede – Pangrango, G. Karang 3

Tabel 4 Contoh kisaran debit mata air di Ciremai (IWACO-WASECO 1989) 5

Tabel 5 Work alirandan schedule of the riset 12

Tabel 6 Output riset 13

Tabel 7 Ringkasan hidrokimia air panas di lereng Ciremai 17

Tabel 8 Daftar teknik statistik dan grafis yang umum digunakan untuk mengklasifikasi sampel air (Guller, et.al 2002). 23

Tabel 9 Rangkuman kondisi hidrogeologi (Irawan dan Puradimaja 2006)..... 32

Tabel 10 Komposisi kimia batuan gunung api Ciremai 33

Tabel 11 Presipitasi data from 13 stasiuns 2006 dan 2007 41

Tabel 12 Ringkasan data mata air..... 45

Tabel 13 Nilai permeabilitas lapangan (cm/menit) 60

Tabel 14 Perbandingan kandungan kalsium pada batuan dan air tanah 70

Tabel 15 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia..... 71

Tabel 16 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia..... 74

Tabel 17 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia..... 76

Tabel 18 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia..... 78

Tabel 4.19 Koefisien korelasi hasil analisis 86

Tabel 20 Factor loading from PCA 95

Tabel 21 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Cibulan .. 103

Tabel 22 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Telaga Remis 108

Tabel 23 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Ciuyah ... 113

Tabel 24 Rangkuman hasil perhitungan 116

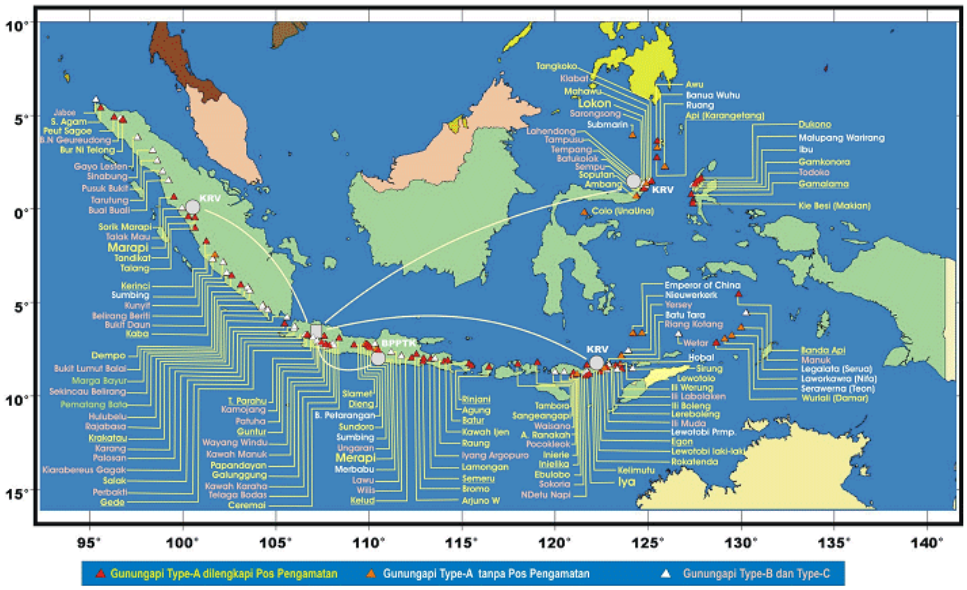
Tabel 25 Resume analisis multivariabel 120

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Distribusi Gunung Api di Indonesia

Indonesia merupakan bagian dari jalur gunung api dunia. Oleh sebab itu, Indonesia memiliki kurang lebih 128 gunung api (Gambar 1), yang menutupi lahan seluas 33.000 km^2 (Deptamben 1979). Sebagian besar diantaranya adalah gunung api berumur kuarter berbentuk strato. Jumlah yang sangat besar tersebut membuat Indonesia sebagai negara penting dalam penelitian kegunungapian di dunia. Namun demikian belum banyak riset yang spesifik menelaah kondisi hidrogeologi di kawasan gunung api.

Menurut Distamben (1979) terdapat 73 gunung api Tipe A. Sebanyak 21 diantaranya (29%) berada di P. Jawa (Tabel 1). Sisanya terletak di Sumatra 12 (16%), Bali dan NTB 5 (7%,) NTT 13 (18%), Kep. Banda 7 (10%), Sulawesi dan Kep. Sangir 11 (15%), Kep. Maluku 4 (5%). Selain itu di P. Jawa terdapat 9 gunung api tipe B, dan 5 tipe C, sebagaimana ditayangkan pada Tabel 2.

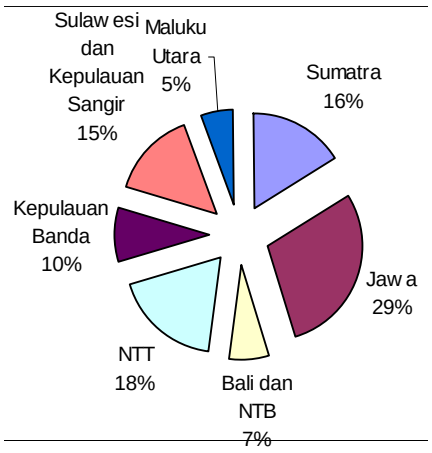


Gambar 1 Jalur gunung api aktif di Indonesia, terdiri dari gunung api berumur kuarter (Deptamben 1979 dalam Puradimaja 2006)

Tabel 1 Jumlah dan distribusi gunung api Tipe A di Indonesia

(Deptamben 1979)

Lokasi	**Jumlah**
Sumatra	12
Jawa	21
Bali dan NTB	5
NTT	13
Kep. Banda	7
Sulawesi dan Kep. Sangir	11
Maluku Utara	4
	73



Tabel 2 Distribusi 35 gunung api aktif di P.Jawa (Deptamben 1979).

No	**Provinsi**	**Tipe A Gunung api**	**Tipe B Gunung api**	**Tipe C Gunung api**
1	Jawa Barat	7	5	5
2	Jawa Tengah	7	2	0
3	Jawa Timur	7	2	0
	Total	**21**	**9**	**5**

1.2 Pemilihan Daerah Riset

Studi komparatif telah dilakukan oleh penulis di G. Ciremai, G. Tangkubanparahu, G. Gede – Pangrango, dan G. Karang. Beberapa karakter dan catatan penting khususnya di bidang hidrogeologi pada masing-masing gunung api telah diringkas sebagaimana ada pada Tabel 1.

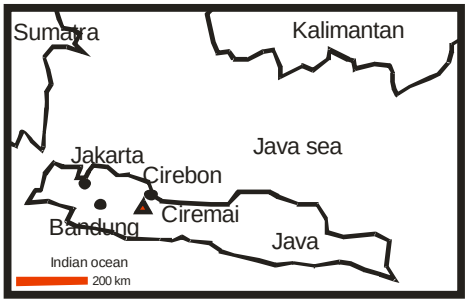
Tabel 3 Ringkasan kondisi hidrogeologi G. Ciremai, G. Tangkubanparahu, G. Gede – Pangrango, G. Karang

No	Parameter	Ciremai (Crm)	Gede (Gd)	Tangkuban-parahu (Tpr)	Karang (Kr)
I.	Topografi (lereng)	Heterogen, 5 – 30°	Relatif homogen 5 – 20°	Heterogen 5 – 70°	Relatif homogen 5 – 20°
II	Geologi:				
II.1	Litologi	22 lapisan: breksi piroklastik, breksi lahar, dan lava	12 lapisan: breksi piroklastik dan lava	18 lapisan: breksi piroklastik dan lava	5 lapisan: breksi piroklastik dan lava
II.2	Struktur	Patahan terpendam	Patahan terpendam	Patahan terpendam	Tidak ada patahan
II.3	Ketebalan tanah pelapukan	1 – 10	1 – 10	1 – 10	1 – 5
III	Sistem Akifer:	Tak tertekan	Tak tertekan	Tak tertekan	Tak tertekan
IV	Mata Air:				
IV.1	Jumlah	116	32	50	27
IV.2	Distribusi	Di kaki gunung, 3 zona	Di kaki gunung, tersebar	Di kaki gunung, tersebar	Di kaki gunung, tersebar
IV.3	Tipe dominan	Rekahan	Rekahan	Rekahan	Depresi
IV.4	Debit (L/det)	1 – 900	1 – 400	1 – 200	1 – 12
IV.5	Temperatur (^{o}C)	23 - 63	23 – 49	23 – 47	27 – 41
IV.6	TDS (ppm)	100 - 3000	100 – 1500	100 – 2000	100 – 600
IV.7	EC (µS/cm)	100 - 2500	100 - 1250	100 – 1700	100 – 400
V	Riset sebelumnya	Riset master	Riset skala regional	Riset skala regional	Riset skala regional

1.3 Deskripsi Daerah Riset

G. Ciremai merupakan gunung api yang bersifat *solitaire* atau terpisah dari gunung api lainnya. Gunung api strato ini memiliki elevasi 3072 mdpl, terletak 20 km ke arah selatan Cirebon. Lereng timur Ciremai masuk wilayah Kabupaten Kuningan, sementara lereng barat masuk wilayah Kabupaten Majalengka (Gambar 2 dan Gambar 3). Puncaknya terletak pada koordinat 6° 53’ 30” *latitude* dan 108° 24’ 00” *longitude* dengan diameter dari puncak ke kaki kurang lebih 10 km. Sebagian kawasan Ciremai, seluas 15.000 ha telah dikelola sebagai kawasan konservasi berupa taman hutan lindung sejak 1994. Peruntukannya ditetapkan berdasarkan SK.424/Menhut-II/04 tanggal 19 Oktober 2004.

Curah hujan rata-rata adalah 3028 dengan kisaran antara 1507 hingga 4746 mm/tahun. Presipitasi yang sangat tinggi tersebut berpotensi menjadi imbuhan ke akifer produktif endapan gunung api dan muncul sebagai mata air di bagian kaki gunung. Tabel 4 memperlihatkan contoh kisaran debit pada 13 mata air.



Gambar 2 Peta lokasi Ciremai dan citra SRTM yang memperlihatkan morfologinya dalam 2D dan 3D.

Gambar 3 Bentuk siluet Ciremai yang memperlihatkan perbedaan kemiringan lereng antara bagian utara dan selatan.

Tabel 4 Contoh kisaran debit mata air di Ciremai (IWACO-WASECO 1989)

No	Nama mata air	Elevasi (mdpl)	Total debit (L/det)
1	Cibulan	480	400-500
2	Cibulakan	500	250-370
3	Cigorowong	472	250-300
4	Cibolerang	375	160-190
5	Cipaniis	475	> 1000
6	Cijumpu	395	130-220
7	Cisemaya	347	500-800
8	Cibujangga	445	170
9	Cicerem	350	140-290
10	Citengah	354	130-170
11	Telaga Remis	210	125-300
12	Telaga Nilem	190	160-400
13	Bojong	191	80-200

Akifer Ciremai yang produktif menjadi sumber air bagi masyarakat Kab. Kuningan, sebagian Kab. Majalengka, dan Kab. Cirebon, bahkan Kota Cirebon. Peran Ciremai yang sangat penting ini mengharuskan pemda Kab. Kuningan untuk mengelola keberlangsungan suplai air melalui berbagai langkah proteksi lingkungan.

1.4 Permasalahan

Sumber imbuhan utama untuk air tanah adalah hujan. Namun demikian alaupun Indonesia memiliki curah hujan tinggi (2 – 4mm/tahun), tetapi tidak terdistribusi secara merata (Puradimaja 2006). Sebagai contoh, kawasan pantai P. Jawa hanya menerima kurang dari 250 mm/tahun, sementara kawasan lereng gunung api dan sekitarnya menerima lebih dari 2500 mm/tahun. Presipitasi yang sedemikan besar di kawasan gunung api menjadi kendali utama kemunculan zona mata air dengan debit besar dan kualitas yang baik. G. Ciremai salah satunya, memiliki ratusan mata air dengan debit bervariasi antara 80 L/det hingga 1000 L/det.

Masalah utama mengenai pengelolaan sumber daya air di Kab. Kuningan adalah kurangnya pemahaman hidrogeologi mata air. Dengan demikian pengaturan tata ruang dan penetapan langkah konservasi belum dapat ditentukan dengan tepat. Berkaitan dengan hal tersebut, Penulis telah merumuskan 2 masalah utama, yaitu:

1. Kendali geologi apa dan besar pengaruhnya kepada keberadaan mata air dan pola aliran air tanah.
2. Sistem input dan output air tanah pada endapan pada gunung api.

1.5 Tujuan

Tujuan riset ini adalah untuk memahami kondisi hidrogeologi di kawasan gunung api strato, dengan pendetilan sebagai berikut:

1. Aspek padatan: Untuk mendeskripsikan dan memisahkan peran geologi kepada pemunculan mata air berbasis analisis hidrokimia air tanah.
2. Aspek fluida: Untuk memotret sistem input dan output air tanah pada sistem akifer endapan gunung api strato.

Untuk mencapai tujuan tersebut digunakan 3 pendekatan: observasi lapangan, analisis statistik terhadap hidrokimia air tanah, dan analisis hidrograf mata air. Rincian untuk tiap metoda akan diterangkan pada bagian metodologi.

1.6 Hipotesis dan Asumsi

Penulis mengajukan 2 hipotesis yaitu:

1) Terdapat 2 kendali geologi terhadap distribusi mata air, yakni jenis batuan dan tanah pelapukan. Utamanya batuan vulkanik meliputi breksi lahar, lava, dan breksi piroklastik di daerah riset mengandung rekahan. Masing-masing jenis batuan telah mengalami proses pelapukan yang menghasilkan perbedaan permeabilitas tanah. Dengan demikian, tanah pelapukan juga berkontribusi secara signifikan kepada potensi air tanah.

2) Terjadi pemisahan mata air pada elevasi yang berbeda mengakibatkan adanya perbedaan pada sistem imbuhan dan pengurasannya serta debitnya yang terdiri dari 3 systems, yaitu sistem aliran lokal, kombinasi, dan sistem aliran regional. Perbedaan tersebut akan terekam pada sifat hidrokimia air tanah.

Latar belakang rasional dari hipotesis di atas berbasis kepada asumsi-asumsi di bawah ini:

1) Hidrokimia air tanah merupakan hasil dari interaksi antara air dengan air, air dengan komposisi batuan serta air dengan udara (Matthess, 1981).

2) Evolusi kimiawi akan terjadi sejak air tanah menginfiltrasi akifer, mengalir dalam akifer, kemudian muncul ke permukaan sebagai mata air. Evolusi ini dinyatakan pula terjadi oleh Chebotarev (1955) dalam Domenico, et al. (1990).

3) Kondisi hidrokimia merupakan cerminan panjang - pendeknya waktu tinggal (*residence time*) dalam akifer. Semakin lama waktu tinggal berarti semakin lama air tanah bersirkulasi di dalam akifer dan berinteraksi dengan komposisi kimia batuan. Akibatnya konsentrasi padatan terlarut atau disebut *Total Dissolved Solids* akan meningkat hingga mencapai kondisi kesetimbangan (Chebotarev, 1955 dalam Domenico, et al., 1990).

4) Penanda kimiawi air tanah berkaitan dengan satu atau beberapa reaksi antara air tanah dengan komposisi akifer (Thyne et.al 2004).

1.7 Metodologi

Peta jalan (*roadmap*) riset didisain untuk dapat selesai dalam 5 fase atau 3 tahun. Hal-hal detil dijelaskan sebagai berikut (lihat Gambar 4 dan Tabel 5).

1.7.1 *Desk Study*

Pada fase ini data sekunder serta informasi yang didapat dari riset-riset sebelumnya akan di analisis kembali untuk memperoleh kondisi regional daerah riset, mencakup peta tematik, topografi, peta geologi, peta hidrogeologi, dan analisis ulang hasil-hasil riset sebelumnya.

1.7.2 Observasi Lapangan

Fase ini mencakup pencatatan koordinat mata air (x, y, dan z), observasi kondisi geologi local di sekitar mata air, pengukuran debit mata air dan sifat fisik-kimia air tanah. Debit (Q) diukut menggunakan metoda *stream channeling*. Untuk debit mata air kecil (kurang dari 1 L/det), pengukuran menggunakan wadah bervolume 1 L dan *stopwatch*. Pengukuran debit dilakukan dua kali (duplets) untuk setiap lokasi.

Pada setiap lokasi sifat fisik-kimia air tanah yang diukut meliputi: temperatur udara (Tu), temperatur air (Ta), Daya Hantar Listrik (DHL), Total Padatan Terlarut atau *Total Dissolved Solids* (TDS), dan pH. Temperatur udara diukur menggunakan thermometer air raksa standar. Parameter lainnya diukur dengan perangkat *handheld* DHL/TDS meter dan pH meter. Untuk uji laboratorium kimia, sampel air tanah diambil dengan botol plastik berukuran 1 L.

1.7.3 Uji Laboratorium

Uji laboratorium terdiri dari pengukuran kandungan ion utama (Ca^{2+}, Na^{+}, Mg^{2+}, K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, dan Cl^{-}) konsentrasi menggunakan *Standard Method Evaluation for Water and Waste Water* (SMEWW) oleh *The America Public Health Administration (APHA)*. Hasil uji kimia diseleksi dengan metoda *ion balance* (lihat rumus), sebelum dianalisis dan diinterpretasi lebih lanjut. Penulis

menentapkan batas *error balances* sebesar 10%. Air tanah dengan *error balance* lebih dari 10 % akan diambil kembali sampelnya dan diuji ulang.

$$[(\Sigma \text{ cations} - \Sigma \text{ anions}) / (\Sigma \text{ cations} + \Sigma \text{ anions})] \times 100\%$$

1.7.4 Analisis dan Interpretasi

Analisis dan interpretasi dalam riset ini memerlukan teknik peng-klasifikasian sampel air tanah berbasis sifat fisik dan kimianya. Untuk itu digunakan metoda grafis dan statistic yaitu: Diagram Piper, Analisis Klaster (AK) atau *Cluster Analysis*, dan Analisis Komponen Prinsipal atau *Principal Component Analysis*. Kombinasi analisis grafis dan statistic, bila dilakukan dengan benar, maka dapat menghasilkan klasifikasi sampel yang konsisten dan saling mendukung (Guller et.al 2002). Analisis statistik menggunakan piranti lunak *Minitab version 14 (trial version) by Minitab Inc*. Interpretasi memiliki target untuk dapat meng-skematisasi sistem hidrogeologi.

1.7.5 Penulisan Disertasi

Fase akhir dari riset ini adalah pelaporan dalam bentuk disertasi. Dokumen disertasi ini kemudian akan dipertahankan di depan Komisi Pasca Sarjana (KPS) dan promoter dalam Sidang Ujian Disertasi. Berikut ini merupakan *outline* penulisan disertasi:

Bab 1 Pendahuluan

Bab pertama ini menyajikan bagaimana distribusi gunung api di Indonesia, bagaimana potensi air tanahnya, pemilihan daerah riset. Dalam bab ini juga dijelaskan mengenai masalah dan tujuan riset ini, deskripsi metodologi yang akan dilakukan, serta output riset.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab tinjauan pustaka menampilkan berbagai dasar teori berkaitan dengan sistem endapan gunung api, pemunculan mata air, sifat fisik dan kimia air tanah, serta berbagai analisis statistik yang akan digunakan untuk menjawab masalah yang ada.

Bab 3 Kondisi Geologi dan Hidrogeologi Regional Ciremai

Pada Bab 3 diulas mengenai kondisi geologi dan hidrogeologi regional Ciremai, berdasarkan riset-riset sebelumnya.

Bab 4 Analisis Sifat Fisik dan Kimia Air Tanah

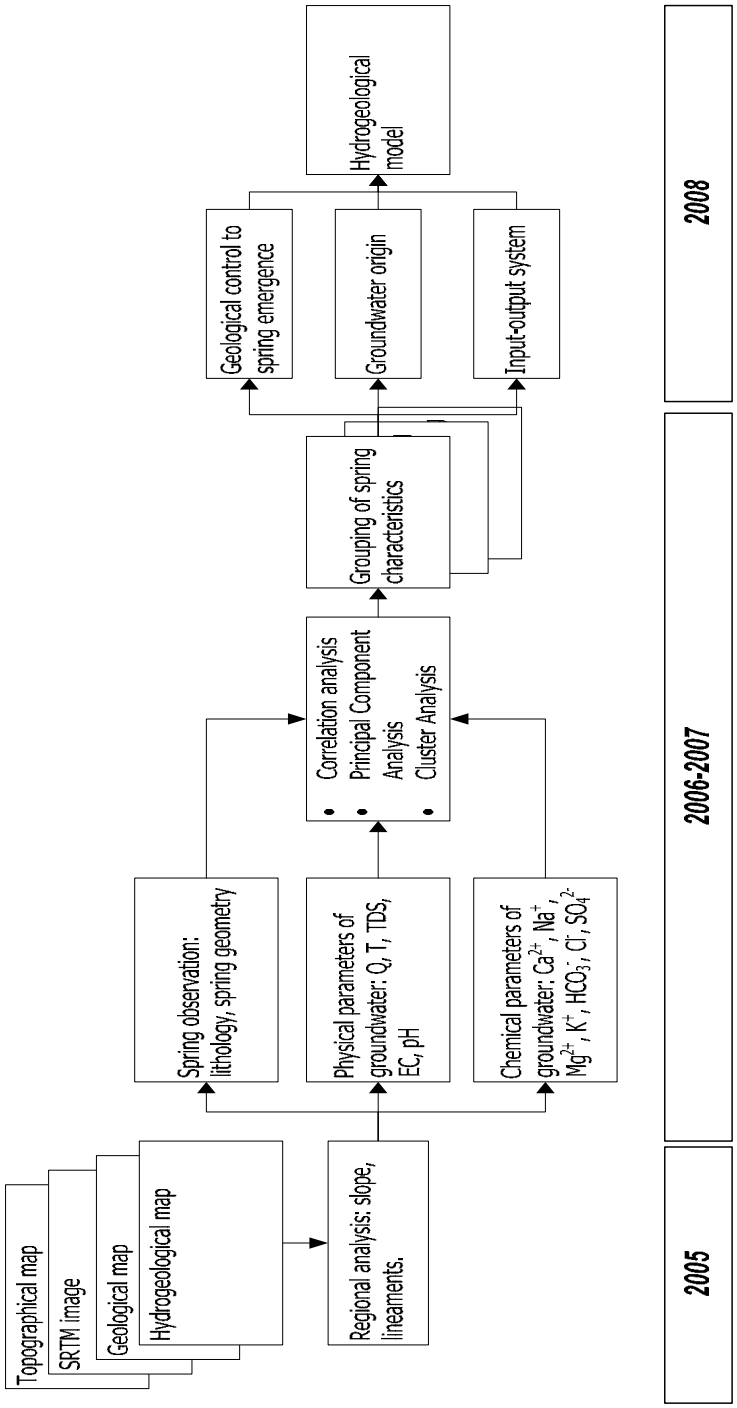
Pada bagian ini diterangkan berbagai hasil analisis terhadap sifat fisik dan kimia air tanah.

Bab 5 Analisis Hidrograf Mata Air

Analisis lebih jauh dilakukan terhadap data pengukuran *time series* terdiri dari debit mata air, curah hujan, temperatur air dan udara, serta nilai TDS. Analisis detail ini hanya dilakukan di 3 lokasi mata air: Cibulan, Telaga Remis, dan Ciuyah.

Bab 6 Kesimpulan

Bab ini menyimpulkan hasil riset secara menyeluruh dan merumuskan jawaban atas daftar permasalahan yang ada.



Gambar 4 Peta jalan riset perioda 2005-2008

Tabel 5 Work alirandan schedule of the riset

No	Acitivity	Work load		Schedule
		Sum	Units	2005 2006 2007 2008 (J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D)
I	**Pre-survei stage (Studio)**			
I.1	Maps digitalization			
I.2	Maps analyses:			
I.2.1	Topografismaps	1	set	
I.2.2	Geological maps	1	set	
I.2.3	Secondary data analyses	1	set	
I.2.4	Remote sensing analyses (SRTM)	1	set	
I.3	Literature study	1	set	

No	Activity	Work load		Jadual kerja
		Jumlah	Satuan	2005 2006 2007 2008 (J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D)
II	**Field surveistage**			
II.1	Mata air observation	100	mataair	
II.1.1	Fisik properties: Q, T, pH, DHL, TDS, Eh	100	sampel	
II.1.2	Water sampling	100	sampel	
II.1.3	Exposure	100	lokasi	
II.1.4	Geometri mataair	100	mataair	
II.2	Pengujian kimia air (ion utama): Ca, Na, Mg, K, HCO3, Cl, SO4	100	sampel	
II.2.1	Sampel airtanah dari mataair	81	sampel	
II.2.2	Sampel airtanah dari sumur	10	sampel	
II.2.3	Sampel air hujan	4	sampel	
II.2.4	Sampel air sungai	5	sampel	
II.3	Pengukuran geolistrik (pada lokasi terpilih)	20	titik	
II.3.1	Pengukuran data			
II.3.2	Pengolahan dan interpretasi data			
II.3.3	Rekonstruksi penampang			
II.4	Pengujian parameter hidrolik lapangan (pada lokasi terpilih)	5	lokasi	
II.4.1	Pemboran dangkal	15	titik	
II.4.2	Pengukuran permeabilitas lapangan	25	titik	
II.4.3	Uji permeabilitas laboratorium	15	titik	

No	Aktivitas	Beban kerja		Jadual kerja
		Jumlah	Satuan	2005 2006 2007 2008 (J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D)
III	**Tahap Pengolahan Data (Studio)**			
III.1	Pengolahan data mataair			
III.1.1	Penyusunan database mataair			
III.1.2	Pengolahan peta			
III.1.3	Pembuatan penampang			
III.2	Analisis statistik multi variable			
III.2.1	*Principle Component Analisis*			
III.2.2	*Analisis klaster*			
III.3	Pengujian hasil riset			
III.4	Penyusunan desertasi			
III.5	Penyusunan publikasi	7	bh	

1.8 Output Riset

Riset ini diharapkan dapat:

- Menghasilkan model hidrogeologi mata air pada sistem akifer gunung api strato serta parameter geologi yang mengendalikan pemunculan mata air.

Menguji aplikasi metoda grafis dan statistik multivariabel AK dan AKP untuk memisahkan sampel air tanah serta menggambarkan sistem input dan outputnya. Secara rinci, output riset ditampilkan pada

- Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6 Output riset

Hasil	Aspek kebaruan
Model hidrogeologi di kawasan gunung api strato berdasarkan observasi mata air dan analisis statistik terhadap sifat fisik dan kimia air tanah.	Kombinasi observasi mata air dan analisis statistik terhadap sifat fisik-kimia air tanah masih belum banyak digunakan dalam membangun model hidrogeologi.
Parameter geologi yang mengendalikan sistem air tanah dengan memanfaatkan analisis statistik multivariabel metode: AKP dan AK.	AKP dan AK masih belum banyak digunakan sebagai alat untuk mengklasifikasikan mata air, khususnya dalam analisis metoda terbalik (*inverse*).
Model tipical hidrograf mata air di kawasan gunung api.	Model tipikal hidrograf mata air di kawasan gunung api, bahkan lebih luas lagi di Indonesia, masih belum banyak dimunculkan atau dimanfaatkan dalam analisis hidrogeologi.

1.9 Catatan

Rise-riset yang sebelumnya telah dilaksanakan di Ciremai umumnya dalam bidang kajian geologi regional, hidrogeologi regional, kimia batuan vulkanik, gas, pergerakan tanah akibat aktivitas vulkanisme, dan aktivitas seismik. Riset mengenai hidrogeologi masih dalam skala regional, yakni dalam lingkup delineasi akifer dan analisis kualitas kimia.

Analisis mata air yang lebih rinci serta memanfaatkan statistik multivariabel untuk memisahkan sistem hidrogeologi mata air belum pernah dilakukan. Riset sejenis pernah dilakukan oleh Sunarwan (1999) dan Notosiswoyo (1989) di Tangkubanparahu. Lebih jauh lagi, analisis hidrograf debit mata air untuk mengungkap system hidrogeologi juga belum banyak diungkap oleh para

penelitian sebelumnya. Publikasi ilmiah baik di dalam maupun di luar negeri lebih banyak menampilkan hidrograf mata air karst. Hal ini disebabkan data *time series* debit mata air belum tersedia.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi

Ciremai dikelompokkan sebagai gunung api Tipe A, yakni gunung api masih aktif sejak 1600. Sejarah mencatat gunung api ini meletus 5 kali, pada tahun 1698, 1772, 1775, 1805, dan 1937. Interval terpendek erupsi adalah 3 tahun, sedangkan yang terpanjang 112 tahun (Deptamben 1979, www.vsi.esdm.go.id). Endapan gunung api kuarter di daerah riset terdiri dari 3 generasi erupsi:

- Generasi pertama adalah gunung api berumur plistosen, yang merupakan bagian dari aktivitas vulkanisme plio-plistosen (Bemmelen 1949). Unit ini terdiri dari lava dan breksi yang diendapkan di atas batuan sedimen berumur tersier. Sisa-sisanya dapat dilihat saat ini sebagai Gunung Putri, Pasir Bungkirit, Pasir Wangi, Pasir Garunggang (Ciremai selatan).
- Generasi kedua adalah G. Gegerhalang yang diduga memiliki ketinggian 3500 m sebelum runtuh. Endapan gunung apinya dari tua ke muda terdiri dari Aliran Piroklastik Puncak, Aliran Lava Karangsari, Aliran Piroklastik Argalingga, Aliran Piroklastik Cibuluh, Aliran Lava Cibuluh, Lahar Bantaragung, dan Lahar Kuningan.
- Generasi ketiga berumur holosen, yakni G.Ciremai. Gunung ini tumbuh di bagian utara kaldera Gegerhalang. Produk erupsi Ciremai dari tua ke muda terdiri dari Aliran Piroklastik Palutungan, aliran lava simurugul, aliran piroklastik sadarehe, Aliran Lava Pasirlamelaut, Jatuhan Piroklastik Tegaljamuju, Aliran Lava Guawalet, Jatuhan Piroklastik Ciremai, dan Lahar Pejambon. Erupsi berikutnya menghasilkan Aliran Lava Pucuk, Aliran Lava Buntung, Aliran Lava Sukageri, dan Fall Piroklastik Sukageri.

Marks pada tahun 1959 telah mendeskrisikan formation-formasi batuan di Indonesia, sebagai referensi umum. Kondisi geologi regional juga telah dipetakan oleh Kusumadinata 1977, Silitonga dan Masria 1978, pada skala 1:100.000.

Riset-riset lainnya di kawasan Ciremai dan sekitarnya dapat dijelaskan sebagai berikut. Kajian aspek geofisika dan geokimia telah dilakukan oleh Badrudin 1988

sebagai bagian dari pengukuran geokimia dan COSPEC di Galunggung, Tangkubanparahu, Tampomas dan Ciremai. Hasilnya adalah emisi gas SO_2 pada kondisi normal rata-rata 15 ton/hari, dengan kisaran 13,55 ton/hari hingga 17,25 ton/hari.

Kemudian di tahun 1990, pengukurn *gravity* telah diselesaikan oleh Husein dan Suparan, mengikuti investigasi magnetik yang telah dilaksanakan oleh Said (1984). Pada tahun 1991, Purbawinata dkk mempelajari geokimia batuan Ciremai yang menghasilkan komposisi dominan andesit berjenis hipersten aegirin-augit, andesit aegirin agit antofilit, antofilit augit, dan horblenda. Dari riset ini juga dihasilkan komposisi batuan kalk alkali.

Pemetaan detail untuk memisahkan batuan gunung api dan distribusinya telah dilakukan oleh Suradji (1993). Periset tersebut mempelajari stratigrafi vulkanik dan potensi bencananya pada skala 1:50.000. Peta geologi lainnya juga telah disusun oleh Djuri (1995) dengan skala 1:100.000) dan Situmorang (1995) pada skala 1:50.000 (Gambar 1). Dari riset-riset diatas dapat disimpulkan bahwa Ciremai memiliki setidaknya 22 jenis endapan vulkanik, terdiri dari 11 aliran lava, 9 materials piroklastik, dan 2 breksi lahar.

2.2 Hidrogeologi

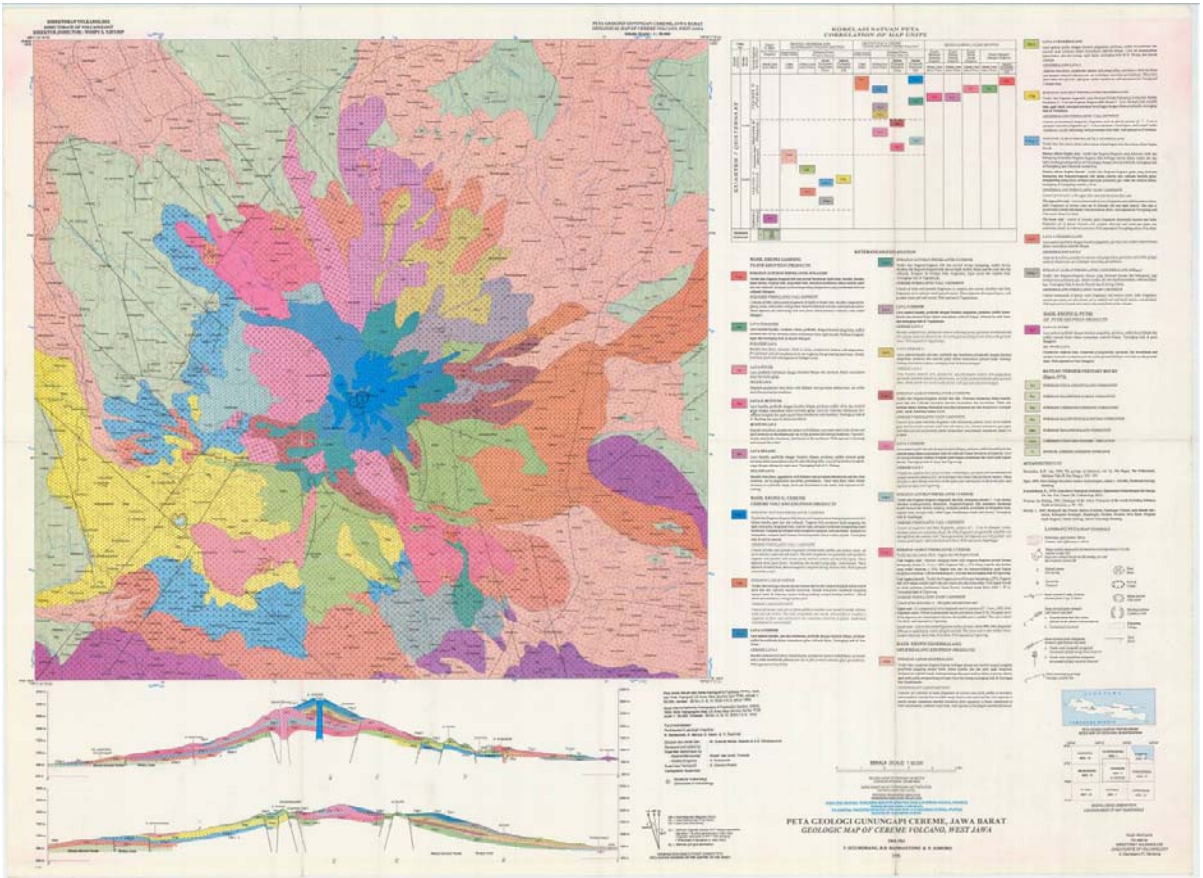
Hidrogeologi Ciremai telah menarik menjadi obyek riset sejak Maier (1861) sebagai riset pertama yang tercatat. Periset ini mempelajari kondisi kimiawi 2 sampel mata air panas di Ciremai. Selanjutnya Kartokusumo (1983) Kartokusumo mengobservasi beberapa mata air panas Ciremai dan Tampomas. Wisnu (1983) telah menguji kimiawi mata air panas di Ciniru dan Sangkanurip (Tabel 7). Temperatur Ciniru adalah 43°C, dengan pH 7,33. Rasio kimia yang berhasil diukur adalah Cl/SO_4 4.2 dan Cl/B 38.1. Estimasi temperatur reservoirnya adalah 79,7^{o}C (SiO_2), 151,3^{o}C (NaK-Ca), dan 200°C (Na/K). Mata air Sangkanurip memiliki temperatur 49°C dan pH 7,70. Rasio kimia air yang berhasil diukur adalah Cl/SO_4 3,9 dan Cl/B 70,5 dengan estimasi temperatur reservoir adalah 97,7^{o}C dengan SiO_2, 168,4^{o}C dengan NaK-Ca, dan 180°C dengan Na/K. Facies air panasnya adalah bikarbonat dan klorida sebagai akibat interaksi dengan batuan sedimen laut di bawahnya.

Tabel 7 Ringkasan hidrokimia air panas di lereng Ciremai

Mata air	pH	Rasio Cl		Temperatur reservoir (^oC)		
		Cl/SO_4	Cl/B	SiO_2	NaK-Ca	Na/K
Ciniru	7.33	4.2	38.1	79.7	151.3	200
Sangkanurip	7.7	3.9	70.5	97.7	168.4	180

Riset yang lebih komprehensif telah dilakukan oleh IWACO-WASECO (1989) Menurut periset tersebut sisem akifer regional di Ciremai terbagi menjadi 3 sistem yaitu aluvial, vulkanik kuarter/muda, dan sedimen tersier. Sistem akifer aluvial tersebar di bagian dataran rendah di kaki Ciremai yang terdiri dari akifer media pori berupa pasir lepas. Sistem akifer vulkanik kuarter memiliki karakter akifer yang heterogen dengan produktivitas tinggi, berupa media pori pelapukan tanah dan media rekahan batuan segar. Sistem akifer sedimen tersier terletak di bawah sistem gunung api, tersusun atas akifer berproduktivitas rendah. Air tanah tersimpan pada tanah pelapukan dan pasir lempungan, serta rekahan mikro pada batuan segar.

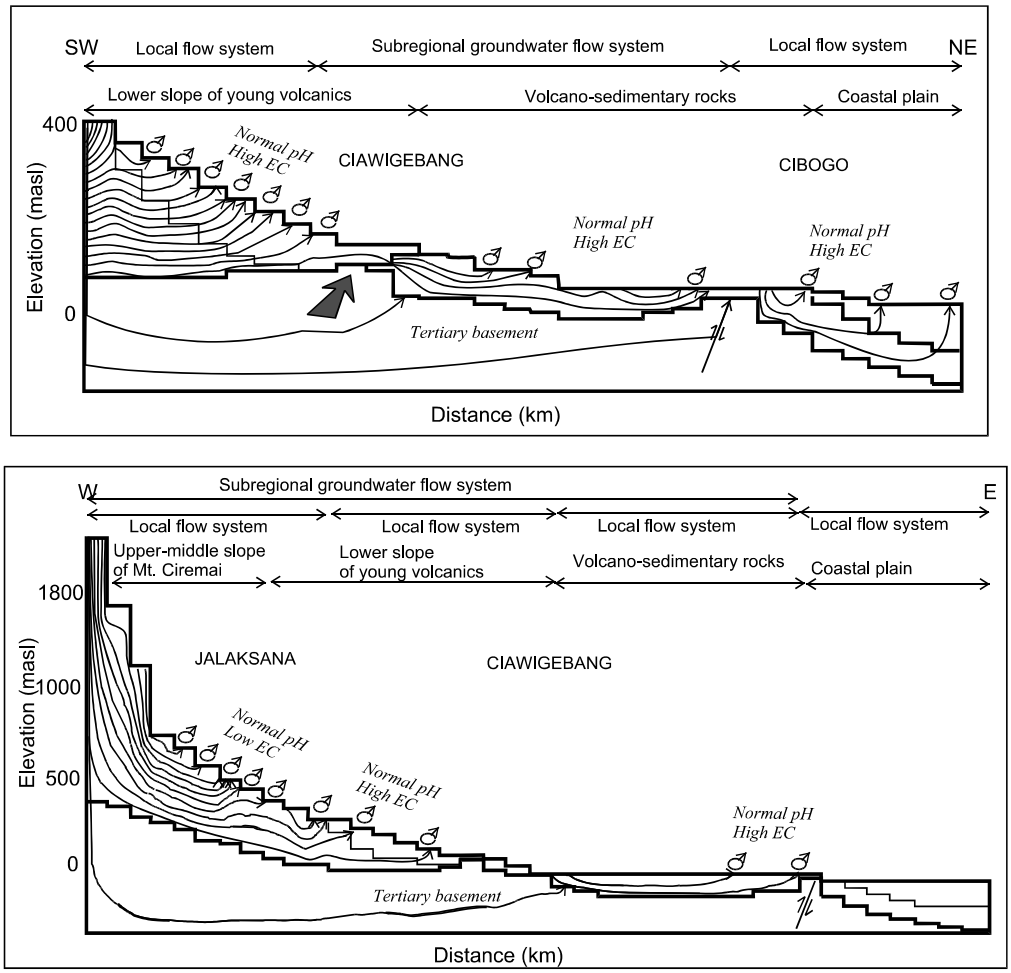
IWACO-WASECO (1989) juga telah mensimulasikan aliran air tanah dalam 2D berarah NW-SE dan W-E memotong puncaknya (Gambar 2) dengan simplifikasi sistem akifer menjadi 2 yakni: system endapan gunung api api produktif dan system batuan sedimen tua yang impermeable sebagai batuan dasar cekungan air tanah. Hasil simulasi berarah SW-NE terdapat konsentrasi pemunculan mata air yang tinggi pada elevasi 100 to 400 mdpl, dengan system aliran local dan sub regional. Jumlah mata terlihat sedikit pada elevasi lebih rendah dari 100 mdpl. Selanjutnya pemunculan mata air pada elevasi 250-650 mdpl dikendalikan oleh tekuk lereng pada elevasi 800 mdpl. Tekuk lereng tersebut terbentuk karena ada perubahan dominasi jenis batuan. Pada elevasi lebih tinggi dari 750 mdpl dominan lava kemudian berubah menjadi dominan breksi lahar pada elevasi lebih rendah dari 750 mdpl).



Gambar 1 Peta geologi gunung api oleh Situmorang (1995)

Situasi yang mirip juga terlihat pada penampang berarah W-E. Gambar 2 memperlihatkan zona mata air pada elevasi 100 mdpl to 750 mdpl. Zona ini dikendalikan oleh tekuk lereng pada elevasi 750 – 800 mdpl. Aliran air tanahnya diperkirakan sebagai tipe liran lokal, diindikasikan oleh pH normal dan DHL yang rendah.

Riset lainnya juga telah dilakukan oleh Irawan (2001) berupa tesis magister. Periset tersebut berhasil mengkarakterisasi sistem akifer dan pola aliran air tanah pada lingkup kecil di lereng timur Ciremai.



Gambar 2 Simulasi alira air tanah di lereng timur G. Ciremai (IWACO 1989)

2.3 Analisis Kelurusan dan Rekahan

Kelurusan (*lineament*) dan rekahan (*fracture*) memiliki banyak definisi. Di internet, dapat dikumpulkan tidak kurang dari 20 buah definisi. Beberapa terminologi yang terkait adalah kelurusan geologi (*geologic lineament*), kelurusan tektonik (*tectonic lineament*), kelurusan foto (*photo lineament*) atau kelurusan geofisik (*geophysical lineament*). Definisi kelurusan yang paling banyak dirujuk adalah dari Hobbs (1904) dalam Sander (2007) yaitu kelurusan adalah garis landsekap (*landscape line*) yang dapat dikenali secara signifikan yang disebabkan adanya kekar dan patahan, yang dapat memperlihatkan arsitektur batuan dasar.

Lebih jauh lagi, riset oleh Lattman dan Parizek (1964) dikenal sebagai riset *pioneer* dalam bidang eksplorasi air tanah melalui pemetaan kelurusan (*fracture traces*) yang diidentifikasi dalam citra *stereo-pairs* foto udara di kawasan batuan karbonat di Amerika Serikat. Riset tersebut mengemukakan adanya relasi antara produktivitas sumur dengan jarak ke rekahan/kelurusan terdekat.Menurut periset tersebut, pemetaan bentuk-bentuk kelurusan adalah salah satu kunci untuk memahami keberadaan air tanah, khususnya pada kawasan batuan beku/gunung api, metamorf, dan batuan sedimen karbonat.

Di daerah yang didominasi batuan dasar (*bed rock*) dengan porositas dan konduktivitas hidrolik rendah, umumnya air tanah terdapat pada zona rekahan yang hadir sebagai porositas sekunder. Peta topografi, foto udara, dan bermacam citra satelit dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan kelurusan yang diinterpretasikan sebagai manifestasi rekahan di permukaan dan zona nilai konduktivitas hidrolik besar. (Tam et.al 2004). Namun demikian skala citra yang berbeda dapat mengakibatkan perbedaan dalam identifikasi dan interpretasi kelurusan. Hal ini dinyatakan oleh Puradimaja (1991) dalam disertasinya mengenai analisis sifat fisik dan kimia air di kawasan karbonat Perancis Selatan.

2.4 Analisis Sifat Fisik dan Kimia Air Tanah

2.4.1 Analisis Grafis

Umumnya, metoda grafis didisain untuk dapat memperlihatkan proporsi relatif ion utama (Hem 1989). Namun demikian, metoda grafis hanya dapat memperlihatkan

parameter secara simultan dalam jumlah terbatas. Tidak seperti halnya metoda statistik yang dapat memperlihatkan seluruh parameter yang ada. Diagram Piper (Piper 1944) contohnya, merupakan metoda grafis yang paling sering digunakan. Diagram tersebut menayangkan konsentrasi relatif kation dan anion utama pada 2 plot segitiga plot. Di bagian tengah diantara 2 segitiga tersebut, terdapat sebuah plot segiempat tempat setiap titik data diproyeksikan. Segiempat tengah memperlihatkan karakter kimia air tanah (Guller, et.al 2002).

2.4.2 Analisis Statistik Multivariabel

Statistik multivariabel dapat membantu analisis data set yang kompleks. Metode tersebut memungkinkan penggunanya untuk menyelidiki hubungan diantara banyak variabel yang kompleks untuk menghasilkan kesimpulan yang lebih menyeluruh (Wulder 2008). Sebagai bahan dasar untuk analisis tersebut, set data yang terdiri dari variabel dan kasus perlu disusun dalam bentuk matriks kolom dan baris (Tabachnick dan Fidell 1989). Penulis tersebut menyatakan bahwa dalam analisis multivariabel, setidaknya jumlah kasus (baris) 2 kali lipat lebih banyak dibanding jumlah variabel (kolom).

Tujuan saintifik dari aplikasi metoda ini adalah untuk dapat mengidentifikasi dengan baik proses-proses yang mengendalikan evolusi kimia air tanah di daerah studi. Metoda statistik yang digunakan terdiri dari *Hierarchical Cluster Analysis* (HCA) selanjutnya disebut Analisis Klaster (AK) dan *Principal Components Analysis* (PCA) selanjutnya disebut Analisis Komponen Prinsipal (AKP). Metoda AK dan AKP diharapkan dapat mengurai kendali geologi dan hidrogeologi terhadap evolusi air tanah.

Melloul dan Collin (1992) telah menggunakan AKP untuk menukung metoda geokimia klasik dengan Diagram Scholler atau Piper. Periset tersebut dapat mengidenfitikasi dengan baik kelompok air mayor dan faktor yang mengendalikan kualitas air tanah. Schot dan van der Wal (1992) mengaplikasikan AKP dan AK untuk data hidrokimia untuk memperlihatkan dampak aktivitas manusia terhadap kualitas air tanah Aplikasi statistik multivariabel untuk melacak unsur kimia air tanah juga dibantu dengan analisis ini (Farnham et al. 2003).

Seluruh studi diatas menyatakan bahwa analisis statistik secara signifikan dapat membantu untuk mengelompokkan air tanah dan mengidentifikasi mekanisme dominan yang mempengaruhi kimia air tanah. Bila interpretasi hidrokimia dikombinasikan dengan pengetahuan mengenai kondisi gelogi, maka metoda statistik ini dapat memantau dalam analisis aliran air tanah pada complex aquifer systems (Farnham et.al 2003; Stetzenbach et.al 2001, Cloutier et.al 2008).

A. Analisis Komponen Prinsipal (AKP)

Analisis Komponen Prinsipal (AKP) atau dikenal dengan *Principal Components Analysis* (PCA) merupakan salah satu teknik klasifikasi data secara simultan. AKP adalah metoda statistik yang dapat mengidentifikasi pola dan struktur data serta menampilkan perbedaan dan kesamaannya (Guller, et.al 2002, Davis 2006). Peng-klasteran yang paling sering digunakan dalam ilmu kebumian *hierarchical clustering* (Davis, 1986), untuk mengklasifikasi data hydrogeokimia (Steinhorst dan Williams 1985, Schot dan van der Wal, 1992, Guler et al 2002). Jumlah komponen yang dipilih untuk dianalisis ditetapkan 3 komponen saja, berdasarkan Kaiser criterion dengan *eigenvalue* lebih besar dari 1 (StatSoft Inc. 2004).

Metode ini sangat bermanfaat untuk mengevaluasi kesamaan dan perbedaan dalam data. Kelebihannya yang lain adalah AKP dapat mengidentifikasi pola dalam data dan mengkompres data tersebut (Smith, 2002). Metoda ini akan memproyeksikan data multidimensi menjadi kumpulan data dengan dimensi lebih rendah dengan menandai variasi data. AKP juga sering digunakan sebagai pendukung analisis lainnya, misalnya pemodelan, regresi, dan penyusunan klaster.

B. Analisis Klaster (AK)

Teknik statistik lain yang digunakan adalah Hierarchy Cluster Analysis (HCA) atau Analisis Klaster (AK). Teknik ini juga digunakan untuk mengklasifikasi data. Namun demikian teknik ini tidak memperlihatkan informasi mengenai komposisi kimia hasil klasifikasi. Menurut Smith (2002), ada 3 tahapan dalam AK:

1. Penyaringan terhadap *noise/outliers*. *Noise* dan *outliers* dapat berupa kesalahan pengukuran yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Keduanya harus dikeluarkan dari analisis. Kehati-hatian diperlukan dalam

penyaringan karena *noise/outliers* dapat saja betul pengukurannya tetapi merupakan anomali.

2. Pemilihan jenis jarak antara klaster. Kriteria antar klaster dapat berupa jarak (*distance measuring*) atau derajat kesamaan (*degree of* similarity).

3. Pemilihan kriteria peng-klasteran. Jenis-jenis kriteria tersebut adalah *nearest neighbour* (data terdekat) dan *furthest neighbour* (data terjauh). Kriteria yang pertama menggunakan titik data yang terdekat dengan titik data yang sedang diukur sebagai referensi. Sebaliknya, kriteria yang kedua menggunakan titik data yang terjauh sebagai referensi.

Tabel 8 Daftar teknik statistik dan grafis yang umum digunakan untuk mengklasifikasi sampel air (Guller, et.al 2002).

Method	Cations used	Anions used	Other parameters	Input data and plotting units
Cluster analysis (HCA and KMC)	All major, minor and trace elements	All major, minor and trace elements	All applicable parameters Yes (1) or no (0) statements, discrete variables	Input: *z*-scores of the log-transformed data Output: distance matrix (KMC) and dendogram (HCA)
Principal components analysis (PCA)	All major, minor and trace elements	All major, minor and trace elements	All applicable parameters Yes (1) or no (0) statements, discrete variables	Input: *z*-scores of the log-transformed data Output: PCA scores
Fuzzy k-means Clustering (FKM)	All major, minor and trace elements	All major, minor and trace elements	Same as above	Input: same as above matrix Output: membership
Piper diagram	Na + K, Ca, Mg	Cl, SO_4, $HCO_3 + CO_3$	n/a	Relative %meq L^{-1}
Collins bar diagram	Na + K, Ca, Mg	Cl, SO_4, HCO_3 (or $HCO_3 + CO_3$)	n/a	Relative %meq L^{-1} or meq L^{-1}
Pie diagram	Na + K, Ca, Mg	Cl, SO_4, HCO_3	n/a	Relative %meq L^{-1}
Stiff pattern diagram	Na (or Na + K), Ca, Mg Fe (optional)	Cl, SO_4, HCO_3 CO_3 (optional)	n/a	meq L^{-1}
Schoeller semi-logarithmic diagram	Na + K, Ca, Mg	Cl, SO_4, HCO_3	n/a	meq L^{-1} in log-scale
Chernoff faces	Up to 20 parameters can be plotted			meq L^{-1} or mg L^{-1} Other parameters in their respective units

2.5 Evolusi Air Tanah

Berbagai rujukan mengenai evolusi air tanah telah dipelajari, diantaranya Hem (1980), Drever (1988), dan Chebotarev (1955) dalam Domenico an Scwartz (1997). Sebagaimana dinyatakan oleh Drever (1988), salah satu proses yang dapat meningkatkan salinitas air tanah adalah reaksi dengan halite, sejenis evaporit laut yang menjadi sumber ion Na dan Cl.

Evolusi hidrokimia oleh Chebotarev (1955) dalam Domenico dan Schwartz (1997) menyatakan bahwa evolusi air tanah berawal dari fasies bikarbonat dekat kawasan imbuhan kemudian berevolusi menjadi dominan sulfat sejalan dengan alirannya ke arah kawasan pengurasan. Komposisi akhirnya adalah dominan klorida sebagai hasil reaksi dengan berbagai jenis mineral dengan waktu tinggal yang lama.

Pendapat lainnya dari Uliana dan Sharp (2001), bahwa data hidrokimia melintasi aliran air tanah menunjukkan peningkatan nilai TDS dan rasio ion Cl dan HCO_3 serta penurunan rasio Na dan Cl. Pada fasies bikarbonat, air merepresentasikan air imbuhan yang dimodifikasi oleh pelarutan mineral dan pertukaran kation. Pada zona sulfat, fasies hidrokimia dikontrol oleh pelarutan endapan gipsum, anhidrit, pertukaran kation, serta pencampuran dengan air NaCl. Sedangkan pada zona klorida, fasies hidrokimia dikendalikan oleh pelarutan halit.

2.6 Analisis Hidrograf Mata Air

2.6.1 Umum

Observasi mata air adalah sarana untuk mengetahui berbagai proses yang terjadi di bawah permukaan di suatu wilayah, karena mata air mengintegrasikan sinyal proses geologi dan hidrologi pada suatu wilayah dan kurun waktu. Dengan menggunakan pengukuran debit mata air, salah satu hasilnya adalah ukuran waktu pengaliran/waktu tinggal (*residence time*) air tanah dalam akifer (Manga 1999, 2001).

Bentuk hidrograf mata air merefleksikan respon akifer terhadap imbuhan. Bentuk dan gradien kurva resesi (*recession curve*) memberikan informasi yang berharga mengenai storativitas, geometri akifer, serta karakter struktur (retakan, kekar, rongga) pada suatu sistem akifer. Untuk analisis selanjutnya, selain debit, pengukuran karakter sifat fisik dan kimia air secara berurut waktu (*time series*) dapat mengetahui komposisi batuan penyusun akifer.

Durasi dan intesitas presipitasi sangat mempengaruhi bentuk kurva hidrograf debit mata air. Bentuk kurva juga mengindikasikan karakteristik cekungan hidrogeologi seperti bentuk, ukuran, karakter litologi dan tanah pelapukan (Manga 1999, 2001).

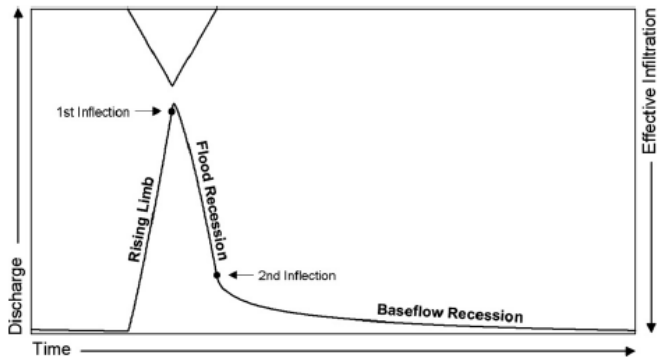
Menurut periset tersebut, litologi dapat muncul sebagai kendali utama dalam membentuk kurva hidrograf. Batuan kedap air cenderung menghasilkan bentuk kurva dengan kenaikan dan penurunan garis yang relatif terjal, karena sifat storativitasnya yang rendah. Sifat itu pula yang menyebabkan bentuk kurva debitnya responsif terhadap kurva presipitasi. Sebaliknya, cekungan hidrogeologi dengan dominasi batuan permeabel akan menghasilkan bentuk naik dan turun yang relatif landai dengan respon yang lambat terhadap bentuk kurva presipitasi.

2.6.2 Hidrograf Debit Mata Air

Proses hidrolika dalam akifer tercermin dari perulangan titik-titik puncak dan gradien kurva resesi (*recession*) serta seberapa cepat responnya terhadap kurva presipitasi. (Gambar 3). Rujukan model umum hidrograf yang berisi anatomi dari suatu kurva serta proses hidrologi yang direfleksikannya menggunakan model mata air karts. Kondisi demikian karena referensi terbanyak mengenai hal tersebut adalah untuk jenis akifer batugamping karst, berdasarkan pencarian rujukan menggunakan *Google*, *Scopus*, *Black-Well Publishing*, *ScienceDirect*, dan berlangganan ke *Hydrogeology Journal*. Namun demikian terdapat beberapa peneliti yang mengekspos bentuk kurva hidrograf endapan gunung api diantaranya Kim et.al (2007), yang menyajikan klaster bentuk hidrograf 23 mata air di Pulau Jeju Korea Selatan (Gambar 4). Manga (1999, 2001) juga telah mempelajari hidrograf mata air di Pegunungan Kaukasus.

Beberapa hal yang menjadi catatan penulis mengapa menggunakan model umum hidrograf mata air karst:

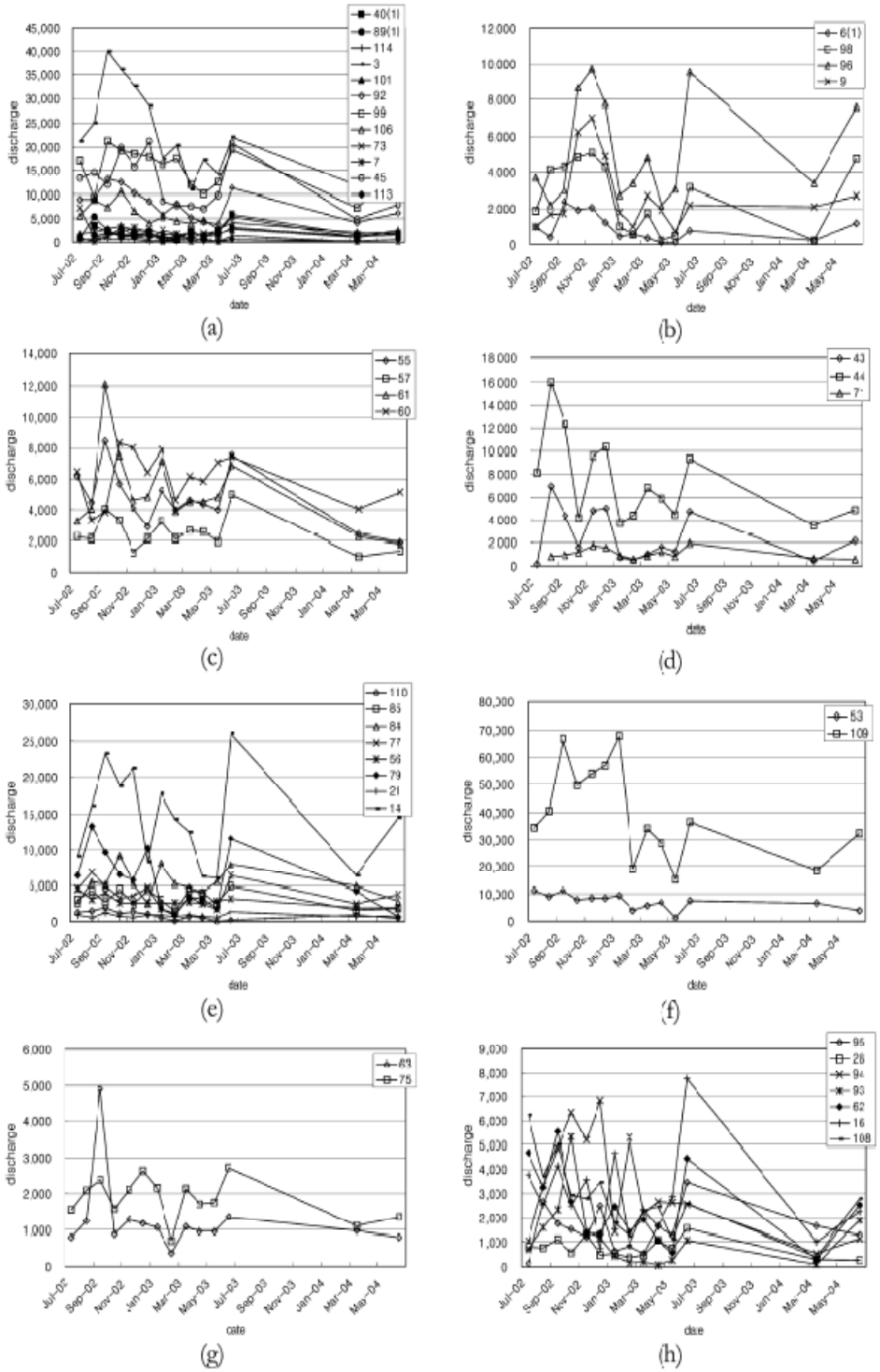
- Hidrograf mata air karst mencerminkan sistem akifer media rekahan. Mata air Ciremai juga berkembang pada sistem akifer media rekahan.
- Perbedaan bentuk kurva yang mungkin terjadi dapat menjelaskan perbedaan sistem hidrogeologinya.



Gambar 3 Model skematik hidrograf mata air di kawasan karst dengan sistem akifer media rekahan murni (Kovacs dan Perrochet 2008)

Penjelasan mengenai anatomi kurva hidrograf mata air untuk contoh kasus sistem akifer media rekahan dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Terdapat jeda waktu (*lag time*) sebelum terjado respon kurva,
- Kurva debit yang naik (*rising limb*), terdiri dari segmen cekung dan cebung yang dipisahkan oleh titik belok (*inflection point*). Kedua segmen mengindikasikan volume simpan (*storage*) maksimum akifer. Titik belok merepresentasikan kapasitas infiltrasi maksimum (Kovacs dan Perochet, 2008).
- Kurva penurunan debit (*recession* atau *falling limb*) mencerminkan kondisi debit mata air awal, sebelum hujan dan infiltrasi yang melimpah terjadi. (the "falling limb"), terdiri dari:
    - Segmen curam: penurunan banjir (*flood recession*)
    - Segmen landai: penurunan aliran dasar (*baseflow recession*).



Gambar 4 Beberapa klaster hidrograf mata air di kawasan gunung api di P. Jeju di Republik Korea (Kim et.al 2007).

Analisis kuantitatif terhadap hidrograf telah dilakukan oleh Maillet (1905) op.cit Memon (1995), yang berpendapat bahwa debit mata air merupakan fungsi dari volume air dalam akifer (*aquifer storage*). Hubungan tersebut diterangkan dalam bentuk persamaan eksponensial sebagai berikut. Bila kurva diplot pada kerja semilog akan membentuk garis lurus dengan kemiringan lereng β.

$$Q_t = Q_0 e^{-\beta t}$$

or

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0.4343\, t^{\beta}$$

and

$$\beta = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0.4343(t_2 - t_1)}$$

Dengan Q_t adalah debit mata air pada waktu t; Q_o debit pada t_o; (t_2-t_1) adalah beda waktu antara Q_t dan Q_o; e basis angka logaritmik; dan β adalah koefisien resesi.

Nilai β mengindikasikan karakter hidrogeologi, khususnya porositas efektif (*effective porosity*) dan transmisivitas (*transmissivity*). Sebagai contoh ilustrasi, bila terjadi kondisi sebagai berikut:

- Nilai β yang menunjukkan kemiringan garis resesi besar
- Perioda paruh ($t_{0.5}$) kecil, yaitu waktu yang diperlukan aliran dasar (*base flow*) berkurang menjadi separuhnya,

maka kondisi diatas mengindikasikan proses pengurasan yang intensif dari volume simpan (*storage*) akifer, baik dalam bentuk rekahan maupun pori matriks penyusun akifer.

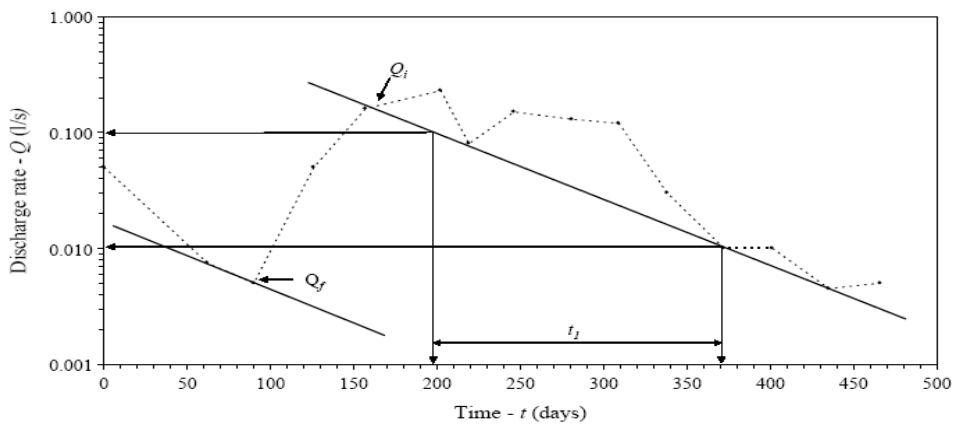
Pada contoh kondisi yang lain, bila:

- Presipitasi tinggi
- Nilai β kecil
- Nilai $t_{0.5}$ besar

mengindikasikan pengurasan lambat yang dapat disebabkan kondisi rekahan yang rapat dengan volume simpan besar, sehingga penambahan volume air yang besar dari imbuhan, tidak langsung terekam pada penambahan debit mata air.

Suatu perhitungan besaran imbuhan (R) berbasis kepada hidrograf debit mata air telah disampaikan oleh Pacheo dan Alencoao (2005) dengan persamaan sebagai berikut dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5. Selanjutnya bila besaran R dalam dimensi volume (L^3) dibagi dengan curah hujan dalam dimensi panjang (L) maka didapatkan estimasi luas kawasan imbuhan berdimensi luas (L^2).

$$R = (Q_i - Q_f)\frac{t}{2,3}$$



Gambar 5 Contoh analisis besaran imbuhan (R) berbasis hidrograf debit mata air menurut Pacheo dan Alencoao (2005)

2.6.3 Hidrografi TDS dan Temperatur Air pada Mata Air

Respon TDS terhadap waktu terdiri dari 3 fasa (Desmarais dan Rojstaczer, 2002): pengenceran (*flushing*), pelarutan (*dilution*), dan pemulihan (*recovery*). Fasa pengenceran merupakan respon terhadap imbuhan yang meningkat di saat musim hujan. Fasa pelarutan ditandai dengan peningkatan nilai TDS. Fasa ini merupakan respon dari pelarutan intensif saat musim kemarau, pada saat imbuhan air hujan mencapai titik terendah. Fasa pemulihan dimulai pada saat nilai TDS mencapai

titik terendah. Fasa ini adalah kondisi stagnan sebelum nilai TDS meningkat pada fasa pelarutan.

Observasi temperatur merupakan salah satu metoda yang tidak memerlukan biaya tinggi untuk mengesktrak properti air tanah. Temperatur air dikombinasikan dengan temperatur udara dapat diinterpretasi untuk mengetahui perilaku air dai bawah permukaan. Salah satu interpretasinya adalah bila bentuk kurva suhu udara dan suhu air tanah sama, tidak terjadi jeda waktu, maka air tanah diperkirakan berada pada akifer tak tertekan yang relatif dangkal. Sementara bila kurava kedua suhu tersebut menunjukkan jeda waktu, maka diperkirakan air tanah berada pada akifer yang relatif lebih dalam. Akifer ini tidak berinteraksi dengan lingkungan di permukaan, sehingga suhu air tanah di dalamnya relatif lebih dingin dan stabil dibanding suhu udara.

2.7 Catatan

Dalam bidang kajian geologi, periset sebelumnya telah mengidentifikasi variasi jenis litologi. Hasil pemetaan terakhir terdapat 22 lapisan endapan gunung api, terdiri dari: 11 aliran lava, 9 aliran piroklastik, dan 2 breksi lahar. Litologi tersebut terbentuk oleh 5 generasi erupsi sejak 1698, yang mengalir ke segala arah. Komposisi batuan umumnya andesite dan tergolong seri kalk alkali.

Riset hidrogeologi yang telah dilaksanakan sebelumnya masih dalam skala regional. Riset-riset tersebut mengkaji pemetaan mata air, hidrokimia air panas, dan pemodelan aliran air tanah regional. Potensi air tanah berada pada 3 jenis batuan utama, yaitu: breksi lahar, lava, dan breksi piroklastik. Ketiga sistem tersebut memperlihatkan dominasi media rekahan yang tercermin pada mata air rekahan. Masing-masing sistem hidrogeologi memperlihatkan karakter sifat fisik dan kimia regional. Fasies bikarbonat merupakan fasies air dominan pada sistem akifer endapan gunung api. Fasies klorida merupakan komposisi kimia air yang telah dipengaruhi oleh interaksi dengan batuan sedimen.

BAB 3 KONDISI REGIONAL CIREMAI

3.1 Geologi

3.1.1 Kelompok Endapan Vulkanik

Endapan gunung api dapat dikelompokkan sebagai fasies, yaitu gabungan/kelompok tipikal batuan yang umumnya muncul pada jarak tertentu dari puncak gunung api sebagai referensi. Salah satu model yang ada adalah Model Fasies Gunung api Strato Fuego oleh Cas dan Wright (1980), dari G. Fuego di Guatemala. Irawan dan Puradimaja (2006) telah membagi fasies endapan gunung api Ciremai berdasarkan peta geologi oleh Situmorang (1995) serta peta topografi untuk menentukan batas elevasi fasies. Menurut periset tersebut, endapan gunung api Ciremai terdiri dari 3 fasies (Tabel 9) berikut ini:

1) Fasies Inti Gunung api (*Volcanic core*) terletak pada elevasi 3050-3178 mdpl, terdiri dari andesit. Fasies ini bersifat impermeabel, sehingga tidak memiliki mata air.

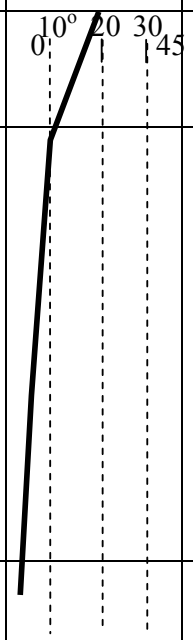
2) Fasies Proksimal Gunung Api (Volcanic Proximal Fasies) terdistribusi pada elevasi 650-3050 mdpl, terdiri dari:

   2a) Proksimal 1 di elevasi 1250 – 3050 mdpl tersusun oleh aliran dan jatuhan piroklastik yang impermeabel dengan fragmen andesit dan matriks tuf

   2b) Proksimal 2 di elevasi 650 – 1250 mdpl tersusun oleh lava andesit yang umumnya mengandung rekahan. Pada fasies ini terdapat zona mata air 1 terdiri dari 3 mata air dengan debit total 98 L/det.

3) Fasies Distal (Volcanic Distal Facies) terletak pada elevasi 100 – 650 mdpl; terdiri dari breksi lahar permeabel, dengan fragmen andesit yang tertanam di dalam matriks tuf atau pasir vulkanik. Batuan ini mengandung rekahan dengan dimensi dan geometri yang tidak teridentifikasi. Pada fasies ini terletak zona mata air 2 terdiri dari 18 mata air dengan total debit 1063 L/det.

Tabel 9 Rangkuman kondisi hidrogeologi (Irawan dan Puradimaja 2006)

Volcanic facies (from McPhie 1993)	**Description**		**Slope**	**Spring**			**Physical and hydraulic properties**
	Symbol	**Lithology**		**Zone**	**Number**	**Q (L/s)**	
Volcanic core (3050 mdpl-estimated 3100 mdpl)		Volcanic neck, consists of andesites to dacite		-	0	0	Impermeable rock with less, data is available
Proximal facies (650 – 3050 masl)							
Proximal 1 facies (1250 – 3050 masl)		Pyroclastic fall and pyroclastic flow. Consists of andesite boulder dan tuff matrices		-	0	0	Impermeable rock, high infiltration rate of soil 1.5 cm/min, no other data is available
Proximal 2 facies (650 – 1250 masl)		Lava flow, consists of andesite to dacite lava		1	3	98 (class 1-3)*	Permeable, secondary permeability: cooling/sheeting joint with unsystematic pola, thick residual soil (2-5 m), final infiltrasi rate of 0.5 – 1.2 cm/min
Distal facies (100 – 650 masl)		Laharic breccias, consists of andesite to dacite boulder with tuff and volcanic sand and matrices.		2	18	1063 (class 1-3)*	Permeable, secondary permeability: fractured with isolated pattern, thick residual soil (2-5 m), final infiltration rate of 1.26 – 2.53 cm/min

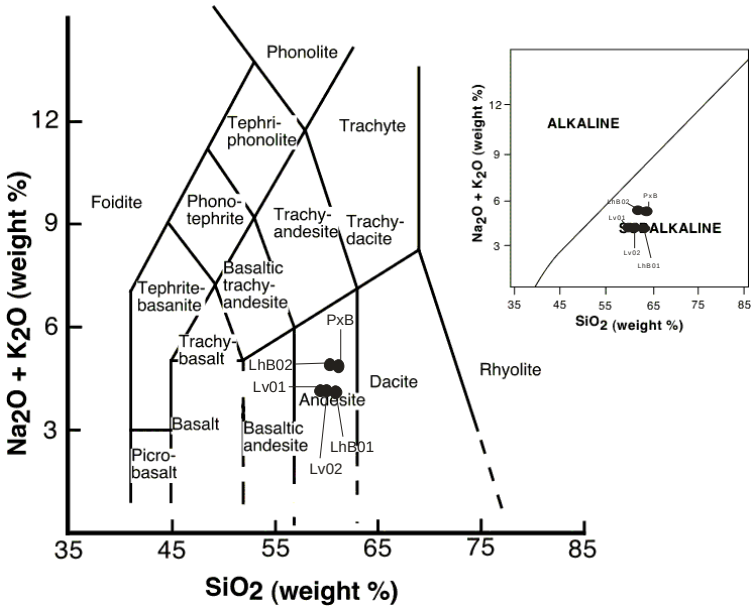
* According to Meinzer classification of mata air debit (op.cit Todd, 1984)

3.1.2 Kimia Batuan

Sebanyak 5 sampel batuan telah diuji komposisi kimianya. Terdiri dari 3 jenis batuan meliputi: breksi lahar (LhB), lava (lv), dan breksi piroklastik breccias (PxB). Hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Tabel 10. Selanjutnya % berat Na_2O dan K_2O serta SiO_2 diplot ke dalam grafik klasifikasi batuan. Plot kedua data tersebut menghasilkan klasifikasi andesit dan sub alkalin (Gambar 5).

Tabel 10 Komposisi kimia batuan gunung api Ciremai

Unsur (% weight)	LhB01	LhB02	Lv01	Lv02	PxB	Rata-rata
SiO_2	63.9	63.6	63.8	64.3	64	54.0
Al_2O_3	19.7	19.9	19.3	18.9	20	19.5
Fe_2O_3	3.9	5	5.1	3.8	4.3	4.4
FeO	4.7	4.6	3.4	4.8	4	4.3
CaO	7.9	6.8	6.9	7.6	6.9	7.2
MgO	3.9	4.2	3.5	3.4	3.6	3.7
Na_2O	3.1	3	3	3.7	3.3	3.2
K_2O	0.9	1	1.1	1.1	1.4	1.1



Gambar 5 Grafik klasifikasi batuan gunung api

3.1.3 Kelurusan dan Rekahan

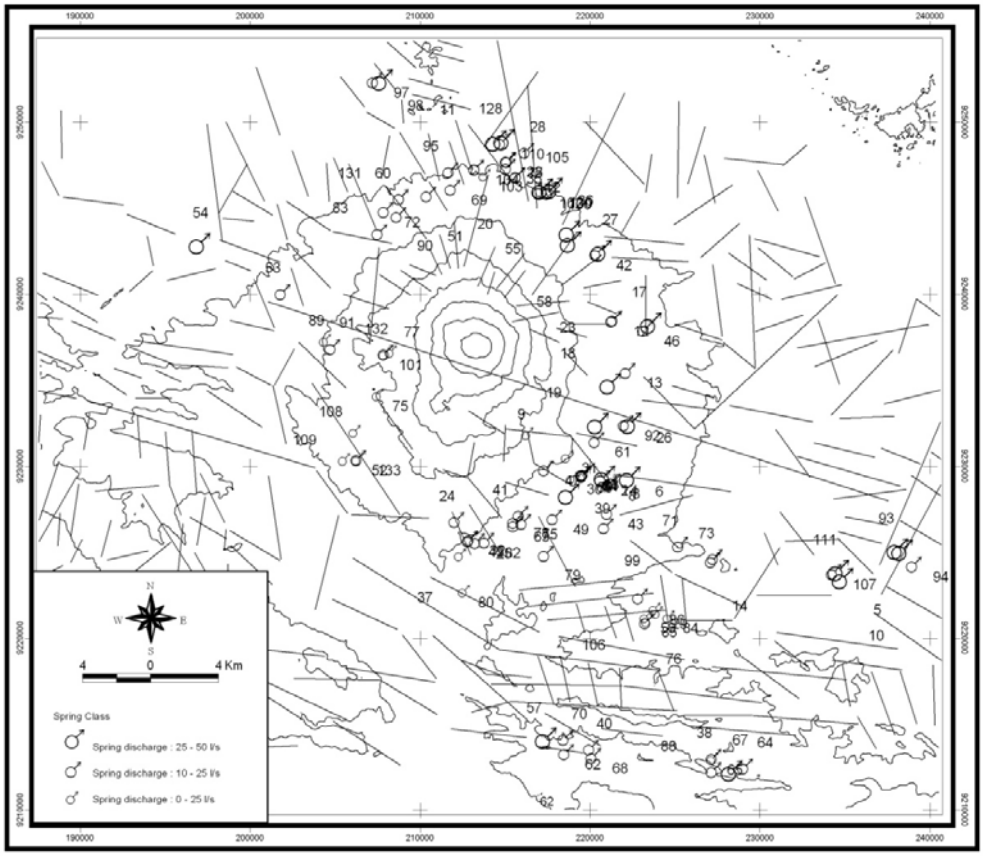
Dalam analisis ini digunakan 3 set data, yakni pola kelurusan yang ditarik dari citra SRTM dan peta topografi pada skala 1:50.000, data berikutnya adalah peta lokasi mata air, dan yang terakhir adalah data debit mata air. Perhitungan yang dilakukan adalah distribusi panjang kelurusan, densitas kelurusan, dan jarak tegak lurus antara titik mata air dengan kelurusan yang terdekat. Untuk memudahkan analisis digunaan piranti lunak *GIS Arc View version 3.3* dengan modul *Linstat*. Dua perhitungan tersebut kemudian dikorelasikan dengan data debit mata air.

Lebih dari 200 kelurusan telah ditarik dan didigitasi pada citra sebagaimana diperlihtkan pada Gambar 6. Diagram roset (*rose diagram*) hasil analisis tersebut ditampilkan pada Gambar 7. Orientasi kelurusan adalah NW – SE. Keduanya menggabungkan kelurusan pada batuan sedimen dan batuan gunung api. Kelurusan pada batuan gunung api umumnya berpola radial, sedangkan kelurusan pada batuan sedimen berarah NW – SE. Dari hasil analisis dapat dikenali bahwa orientasi kelurusan konsisten dengan orientasi sumbu lipatan, patahan, dan dengan struktur regional.

Selanjutnya juga didapatkan bahwa jumlah mata air berkurang secara logaritmik menjauhi kelurusan. Sebagian besar mata air berada pada jarak 400 m dari kelurusan (Gambar 8). Jarak mataair dari kelurusan adalah:

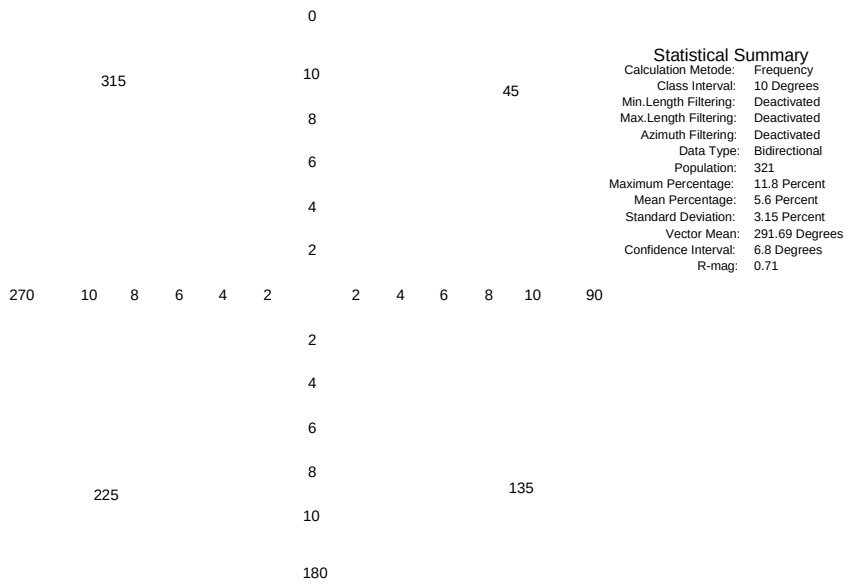
- 0-400 m untuk mata air breksi lahar. Lebih lanjut, terdapat mata air breksi lahar yang berjarak hingga 2800 m dari kelurusan
- 0-1400 m untuk mata air lava
- 200-1000 m untuk mata air breksi piroklastik

Hasil analisis relasi antara jarak mata air dengan posisi kelurusan berdasarkan jenis batuan diatas hampir sama dengan hasil riset Galanos dan Rokos (2006). Periset tersebut melakukan analisis kelurusan di kawasan pegunungan kombinasi antara batuan sedimen dan batuan gunung api di Pulau Naxos Yunani.

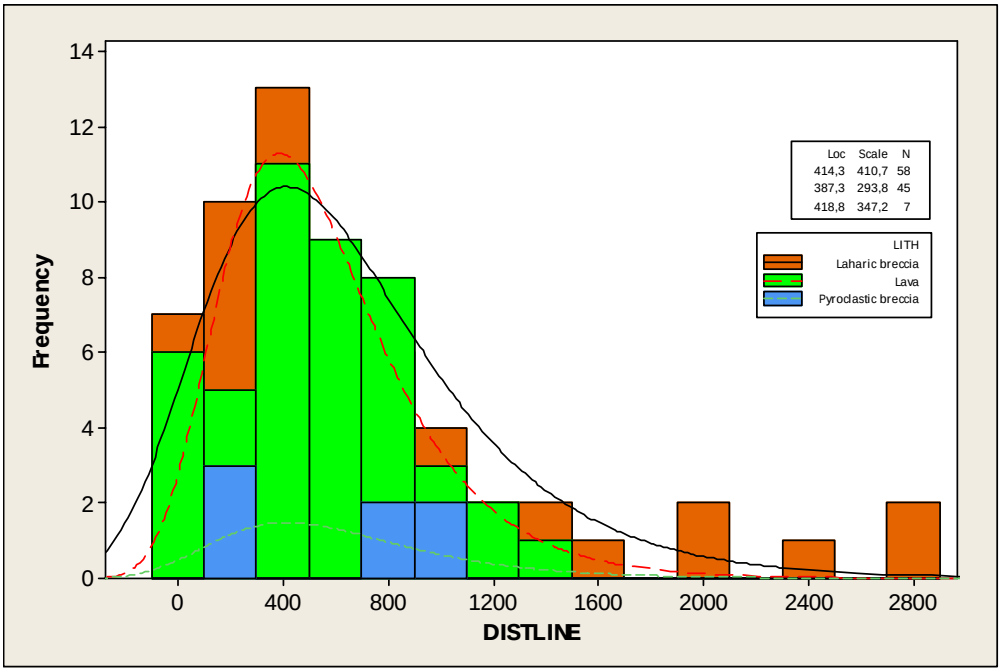


Gambar 6 Kelurusan of study area

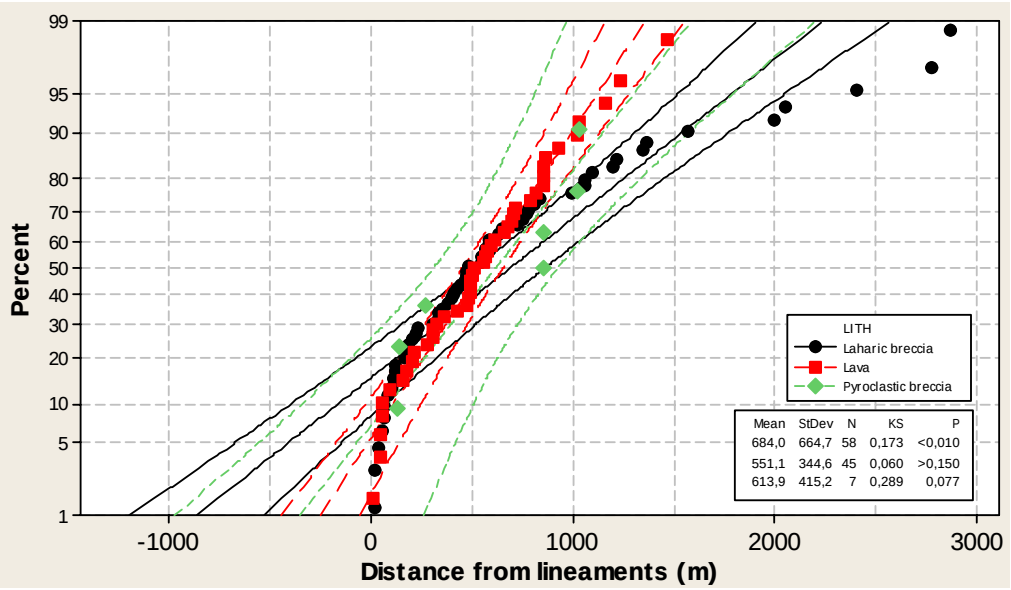
Jarak antara mata air pada lava dengan kelurusan memiliki konsistensi lebih tinggi kepada distribusi log normal dibandingkan mata air pada breksi lahar (Gambar 9). Situasi ini diperkirakan karena homogenitas material lava, bila dibandingkan dengan breksi lahar, yang umumnya bersifat lebih heterogen pada masa dasar dan fragmennya. Bila dibandingkan antara debit mata air dengan jaraknya dengan kelurusan, didapatkan populasi paling tinggi pada jarak 0 – 1000 m, sebagaimana disampaikan pada Gambar 10.



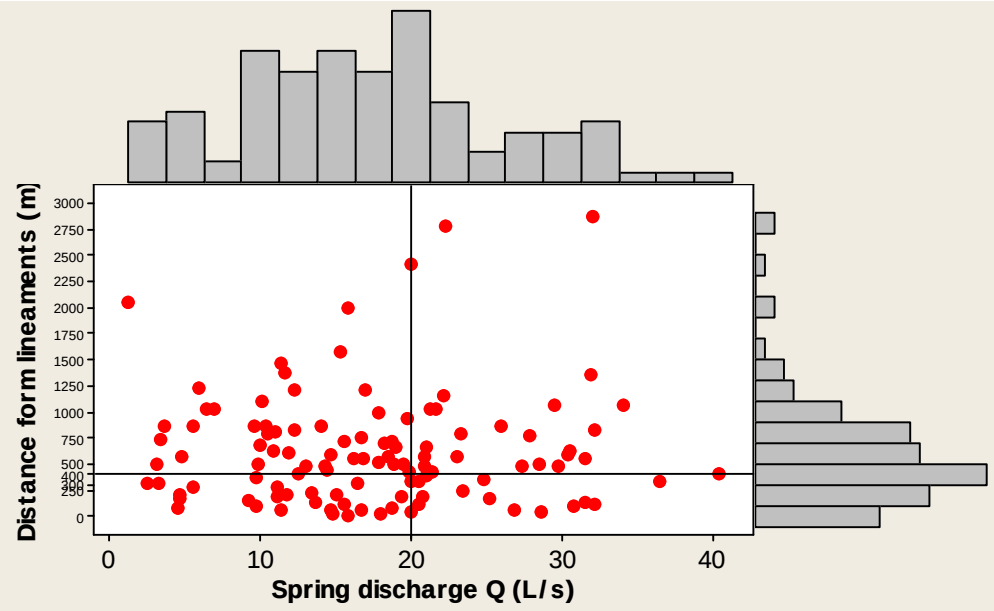
Gambar 7 Diagram roset orientasi kelurusan serta jumlahnya. Garis merah menandai kisaran frekuensi kelurusan pada batuan gunung api, yang berpola radia. Kelurusan di luar lingkaran tersebut adalah pada batuan sedimen.



Gambar 8 Histogram antara jumlah mata air terhadap jaraknya dengan kelurusan yang terdekat.

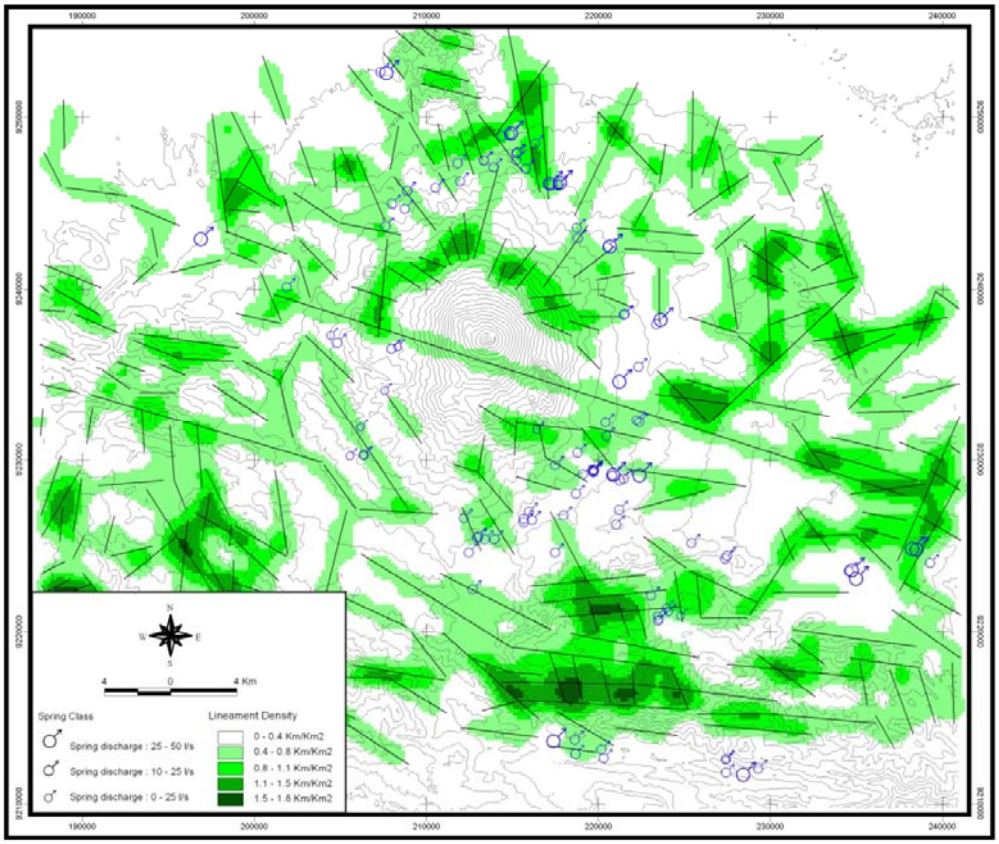


Gambar 9 Distribusi probabilitas jarak mata air dari kelurusan data (dikelompokkan berdasarkan jenis batuan)



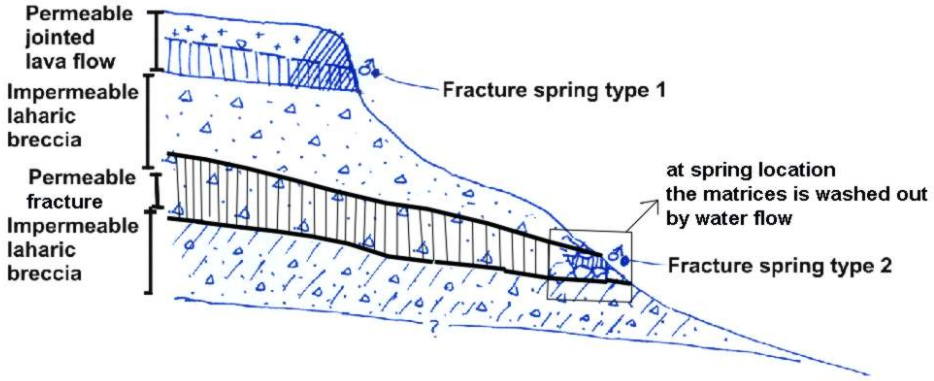
Gambar 10 Plot atara debit mata air (Q dalam L/s) dengan jaraknya terhadap kelurusan (dalam m).

Selanjutnya analisis densitas kelurusan (*lineament density*) telah juga dilakukan dengan output berupa peta densitas kelurusan (Gambar 11). Pada gambar terdapat 12 buah lingkaran (garis terhubung) dengan diameter 4 km yang memperlihatkan kemungkinan adanya relasi antara debit mata air dengan densitas kelurusan. Sebaliknya terdapat 7 buah lingkaran (garis putus-putus) yang memperlihatkan relasi lebih kecil antara kedua parameter tersebut.



Gambar 11 Density map of kelurusan. Full circle indicates possible Q-kelurusan korelasi, dashed circle indicates possible no korelasi between Q-kelurusan

Observasi dan analisis oleh Irawan dan Puradimaja (2006) menghasilkan kesimpulan bahwa zona rekahan mengendalikan debit mata air. Terdapat 2 jenis asal mula rekahan, yakni: rekahan pada aliran lava dan rekahan pada breksi lahar. Jenis yang pertama merupakan kekar pendinginan (*cooling joints*) pada lava yang membentuk bukaan sempit pada batuan. Polanya tidak sistematik dengan orientasi N63^{0}E, N90^{0}E, dan N117^{0}E. Jenis yang kedua dijumpai pada dijumpai pada breksi lahar, yang menyebar mengikuti punggunggan batuan tersebut. Pada lokasi Mata air Cibulan, orientasi rekahannya adalah N93^{0}E, sama dengan orientasi punggungan (Gambar 12).



Gambar 12 Sketsa profil rekahan pada aliran lava dan breksi lahar.

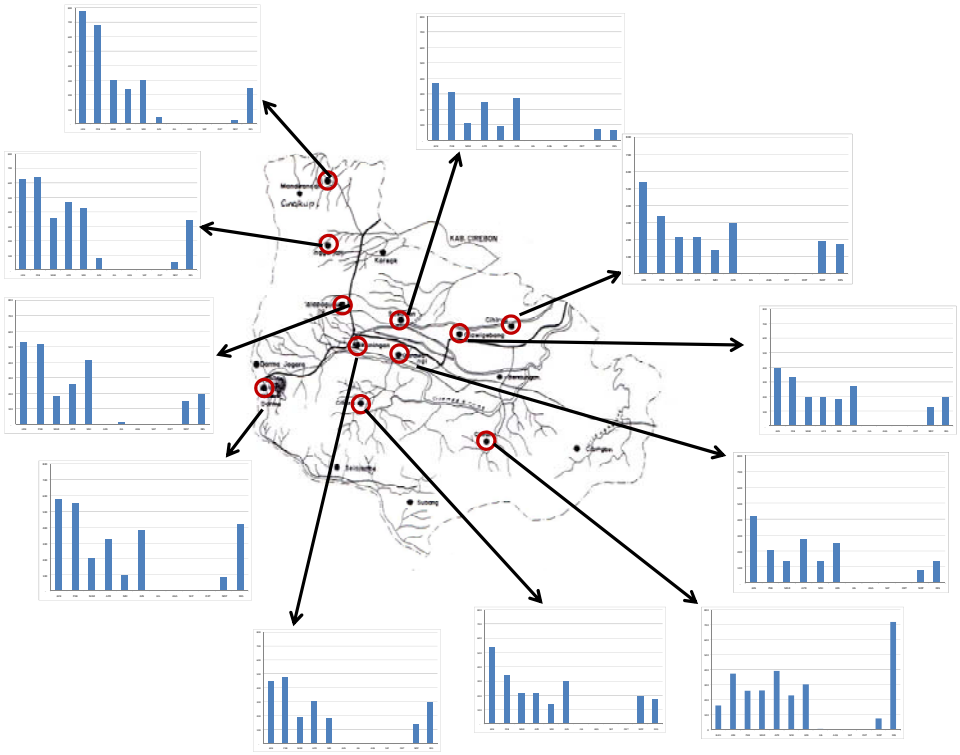
3.2 Hidrogeologi

3.2.1 Data Presipitasi

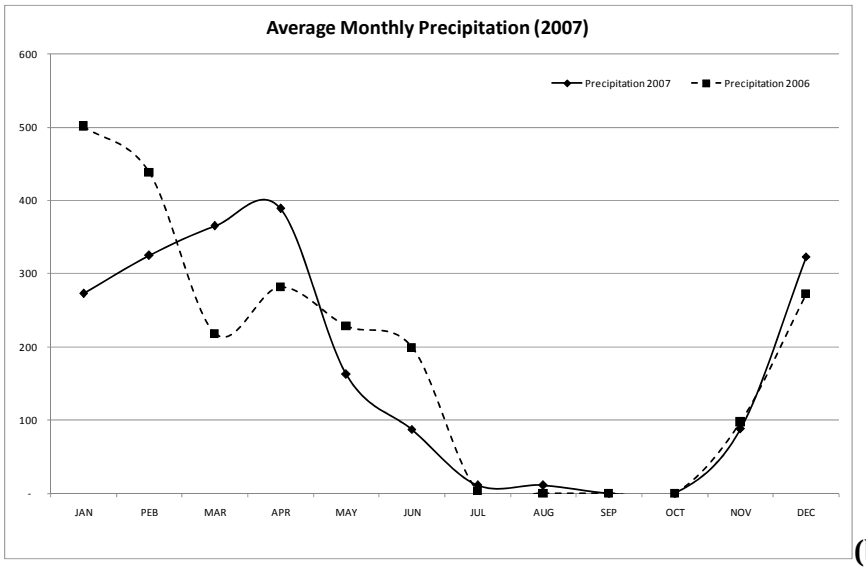
Kab. Kuningan memiliki 18 stasiun penakar hujan. Masing-masing lokasinya disajikan pada Gambar 13[a]. Dari jumlah tersebut, penulis hanya mendapatkan data hujan dari 11 stasiun sebagai berikut: Ciwaru (161 mdpl), Ciawigebang (222 mdpl), Ciniru (250 mdpl), Garawangi (265 mdpl), Cihirup (283 mdpl), Mandirancan (293 mdpl), Susukan (309 mdpl), Linggarjati (414 mdpl), Kuningan (545 mdpl), Kalapagunung (635 mdpl), Waduk Darma (696 mdpl) (Tabel 11). Rata-rata hujan bulanan di daerah ini pada tahun 2006 relatif lebih tinggi

dibanding tahun 2007, yaitu pada bulan January hingga June. Sementara pda bulan Maret dan April, curah hujan tahun 2007 lebih tinggi (Gambar 13[b]).

Curah hjan terdistribusi lebih merata pada ketinggian berbeda pada tahun 2006 (Gambar 14). Stasiun terendah (Ciwaru), mengukur curah hujan total 2600 mm pada tahun 2006, sementara stasiun tertinggi (Waduk Darma) mengukur 3000 mm. Pada tahun 2007 kedua stasiun tersebut mengukur 2700 mm di Ciwaru dan 1700 mm di Stasiun Waduk Darma.



(a)



(b)

Gambar 13 [(a)] Peta stasiun penakar hujan dan data pengukuran rata-rata bulanan. Peta memperlihatkan stasiun yang ada (titik hitam) dan stasiun yang tersedia datanya (lingkaran merah); [(b)] Rata-rata hujan bulanan pada stasiun (2006-2007).

Tabel 11 Presipitasi data from 13 stasiuns 2006 dan 2007

2006

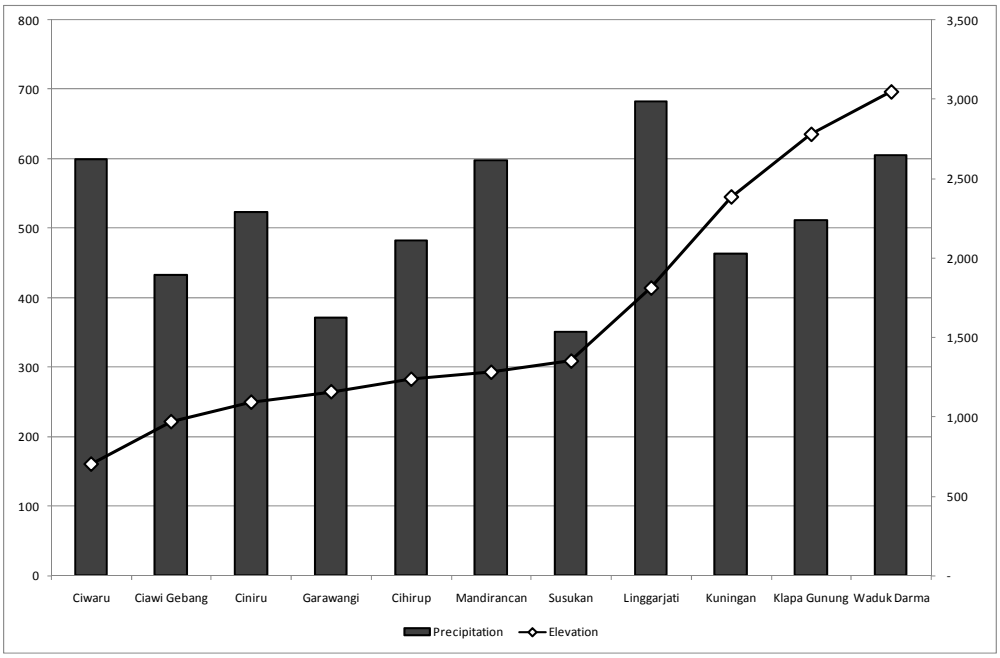
STATIONS	JAN	PEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL
Mandirancan	780	679	303	239	297	46	5
Ciniru	458	500	249	184	324	290	-
Cihirup	537	340	216	215	137	299	5
Linggarjati	623	639	358	463	427	76	4
Klapa Gunung	531	516	178	254	412	-	11
Kuningan	446	479	186	304	179	-	-
Susukan	369	313	111	242	92	271	-
Garawangi	417	203	133	275	134	250	-
Ciawi Gebang	396	333	194	197	181	270	5
Ciwaru	375	260	263	393	229	302	5
Waduk Darma	580	553	205	327	99	382	-
Total	***5,512***	***4,815***	***2,396***	***3,093***	***2,511***	***2,186***	***35***
Average	***501***	***438***	***218***	***281***	***228***	***199***	***3***
Max	***780***	***679***	***358***	***463***	***427***	***382***	***11***
Min	***369***	***203***	***111***	***184***	***92***	***-***	***-***

2006

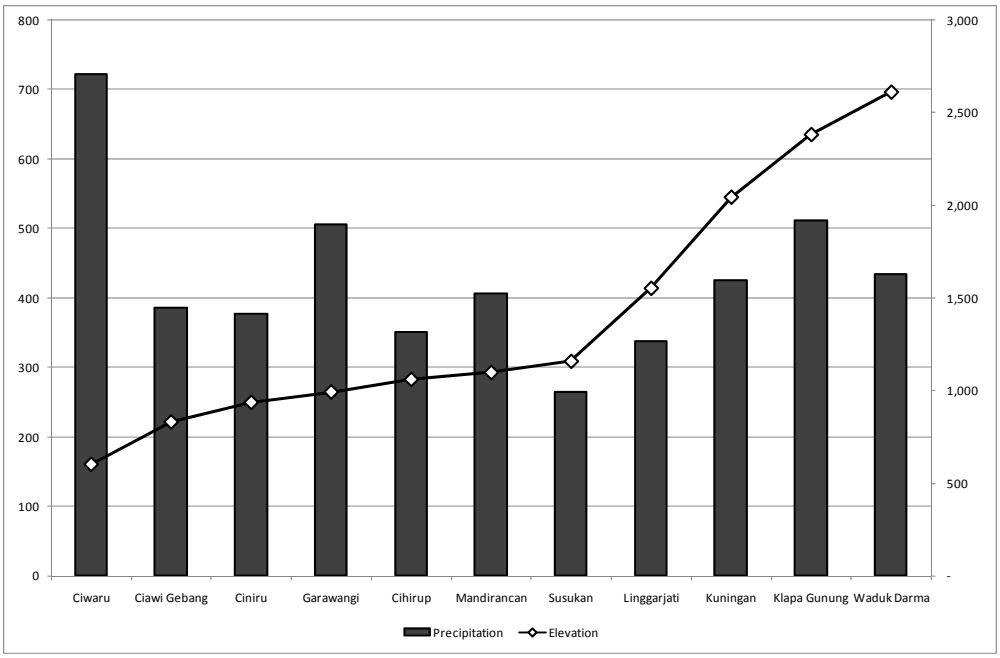
STATIONS	AGS	SEP	OKT	NOP	DES	TOTAL
Mandirancan	-	-	-	28	242	2,619
Ciniru	-	-	-	78	209	2,292
Cihirup	-	-	-	191	173	2,113
Linggarjati	-	-	-	53	344	2,987
Klapa Gunung	-	-	-	143	194	2,239
Kuningan	-	-	-	137	298	2,029
Susukan	-	-	-	72	65	1,535
Garawangi	-	-	-	82	133	1,627
Ciawi Gebang	-	-	-	127	194	1,897
Ciwaru	-	-	-	75	720	2,622
Waduk Darma	-	-	-	85	421	2,652
Total	**-**	**-**	**-**	***1,071***	***2,993***	***24,612***
Average	**-**	**-**	**-**	***97***	***272***	***2,237***
Max	**-**	**-**	**-**	***191***	***720***	***2,987***
Min	**-**	**-**	**-**	***28***	***65***	***1,535***

2007

STATIONS	JAN	PEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	TOTAL
Mandirancan	498	680	633	622	139	111	25	2,708
Ciniru	282	239	333	331	153	105	4	1,447
Cihirup	240	255	280	410	136	96	-	1,417
Linggarjati	387	354	506	378	150	125	-	1,900
Klapa Gunung	276	160	287	336	168	91	-	1,318
Kuningan	260	261	341	412	173	75	-	1,522
Susukan	117	152	249	299	135	42	1	995
Garawangi	178	277	254	358	151	51	-	1,269
Ciawi Gebang	282	273	256	450	204	73	60	1,598
Ciwaru	237	510	462	309	278	92	30	1,918
Waduk Darma	242	410	410	368	99	96	2	1,627
Total	***2,999***	***3,571***	***4,011***	***4,273***	***1,786***	***957***	***122***	***17,719***
Average	***273***	***325***	***365***	***388***	***162***	***87***	***11***	***1,611***
Max	***498***	***680***	***633***	***622***	***278***	***125***	***60***	***2,708***
Min	***117***	***152***	***249***	***299***	***99***	***42***	***-***	***995***



(a)



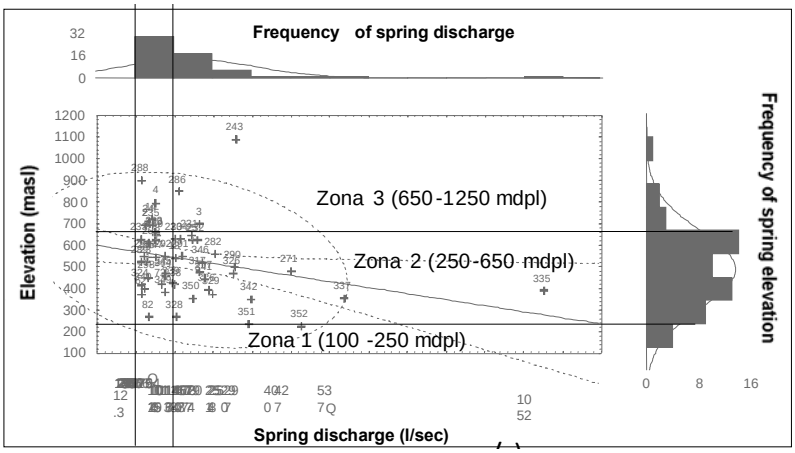
(b)

Gambar 14 [(a)] Data total hujan tahunan bulan Januari-Desember 2006; [(b)] Data total hujan tahunan bulan Januari-Juli 2007

3.2.2 Distribusi Mata Air

Kajian oleh Irawan dkk (2003), berbasis kepada data IWACO-WASECO (1989), telah mendeskripsikan 3 zona mata air secara spasial, yaitu (Gambar 15):

- Zone 1: 100-250 mdpl,
- Zone 2: 250-650 mdpl, dan
- Zone 3: 650-1250 mdpl,



Gambar 15 Mata air occurrences dan debits zone (Irawan dan Puradimaja, 2006).

Bapeda Kab. Kuningan (2002) telah memetakan 161 titik mata air dengan debit bervariasi Hasilnya adala 5 kelas mata air berdasarkan debitnya menurut Meinzer (1923) dalam Todd (1980):

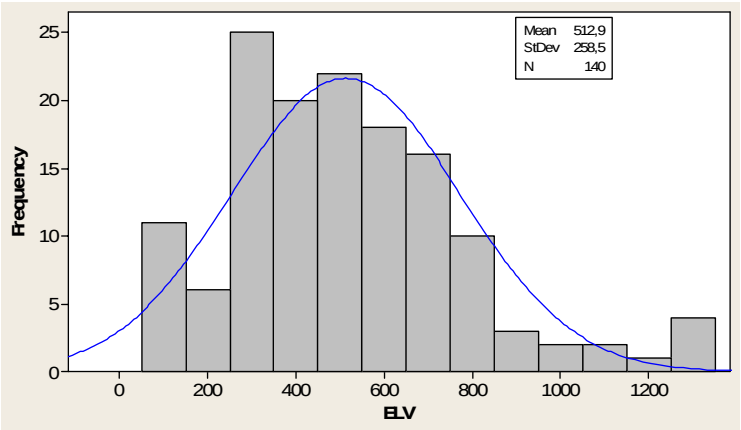
- 6 mata air kelas II (4%),
- 44 mata air kelas III (27%),
- 15 mata air kelas IV (9%),
- 40 mata air kelas V (25%),
- 56 mata air kelas VI (35%).

Survei mata air oleh penulis dilaksanakan pada perioda Mei 2006 hingga Juni 2007, umumnya pada musim kemarau. Sebanyak 140 mata air telah diobservasi, terdiri dari 120 mata air dari lereng timur dan 20 mata air dari lereng barat (Tabel 12). Pada setiap mata air, pengukuran yang dilakukan meliputi 7 parameter: koordinat (x, y, z), debit (Q) in L/s, Total Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solids*) (TDS) dalam ppm, Daya Hantar Listrik (*Electro-Conductivity*) (EC) dalam µS/cm, keasaman (pH), suhu mata air (WT) dan suhu udara (AT) dalam ^{o}C.

Tabel 12 Ringkasan data mata air

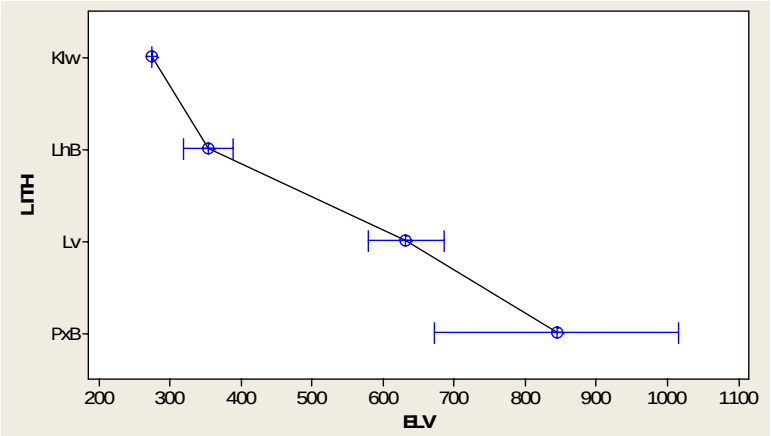
No	Batuan	Jumlah mata air
1	Breksi Piroklastik (PxB)	16
2	Lava (Lv)	52
3	Breksi lahar (LB)	71
4	Formasi Kaliwangu (Klw)	1
	Jumlah	140

Mata air mulai muncul pada elevasi 100 mdpl hingga 1200 mdpl, berdasarkan observasi terhadap 140 mata air. Ketinggian rata-ratanya adalah 512.9 mdpl. Namun jumlah pemunculan mata air tertinggi pada elevasi 250 mdpl dengan 25 mata air. Jumlah mata air kemudian berkurang mengikuti elevasi yang semakin tinggi (Gambar 16).



Gambar 16 Histogram posisi ketinggian mata air

Pada Gambar 17 di bawah ini, dapat dilihat bahwa mata air breksi piroklastik terletak pada daerah yang tinggi, dari ketinggian 675 hingga lebih dari 1000 mdpl. Pada elevasi lebih rendah, 575 – 700 mdpl, terdapat mata air lava. Di bawahnya, terdapat mata air breksi lahar pada 320 – 400 mdpl. Selanjutnya mata air yang muncul dari Formasi Kaliwangu pada elevasi lebih rendah dari 280 mdpl.

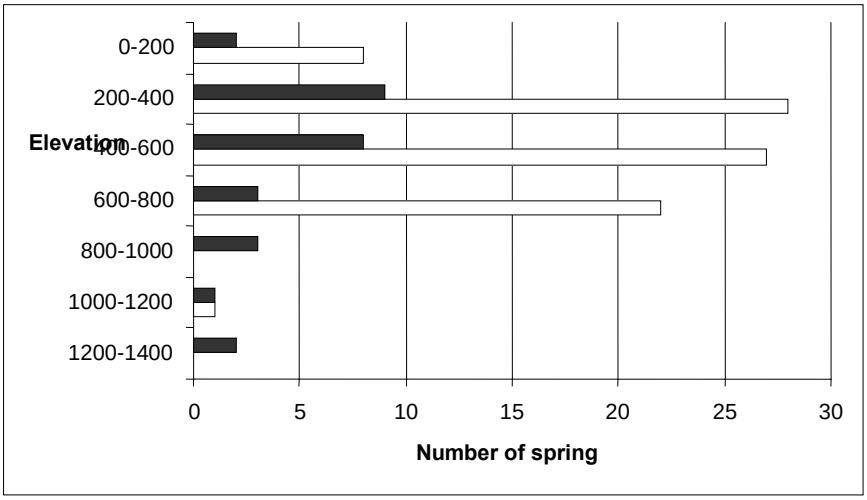


Gambar 17 Plot interval elevasi mata air berdasarkan jenis batuan penyusun akifernya

Observasi tersebut mengindikasikan adanya kombinasi sistem akifer media pori dan rekahan batuan. Air hujan menginfiltrasi tanah pelapukan setebal 2 m hingga 10 m, kemudian mengalir ke dalam rekahan batuan. Aliran air kemudian muncul pada kisaran elevasi 250-750 mdpl, dengan pola aliran radial. Kawasan imbuhan diperkirakan pada elevasi lebih tinggi dari 750 m. Analisis spasial berikutnya dengan membagi Ciremai menjadi 4 kuadran menghasilkan hal-hal berikut ini:

1. Kuadran 1 (timur laut): 37 mata air, lahar 39%, lava 28%, piroklastik 33%;
2. Kuadran 2 (tenggara): 49 mata air, lahar 37.5%, lava 33.2%, piroklastik 29.3%;
3. Kuadran 3 (barat laut): 7 mata air, lahar 30%, lava 10%, Fm. Kaliwangu 50%, piroklastik 10%;
4. Kuadran 4 (barat daya): 23 mata air, lahar 25%, aliran lava 10.5%, piroklastik 64.5%.

Grafik pembanding di bawah ini memperlihatkan bahwa lereng timur memiliki lebih banyak mata air dibandingkan lereng barat (Gambar 18). Gambar tersebut dan penampang geologi pada Gambar 19 memperlihatkan adanya korelasi mata air dengan endapan piroklastik di lereng barat. Sedikit mata air berkorelasi dengan lava pada elevasi 1200-1400 mdpl. Sementara di lereng timur, mata air lebih berkorelasi dengan breksi lahar pada ketinggian 200 – 800 mdpl.



Gambar 18 Perbandingan jumlah dan distribusi mata air antara lereng barat (warna hitam) dan lereng timur (warna putih) berdasarkan ketinggian

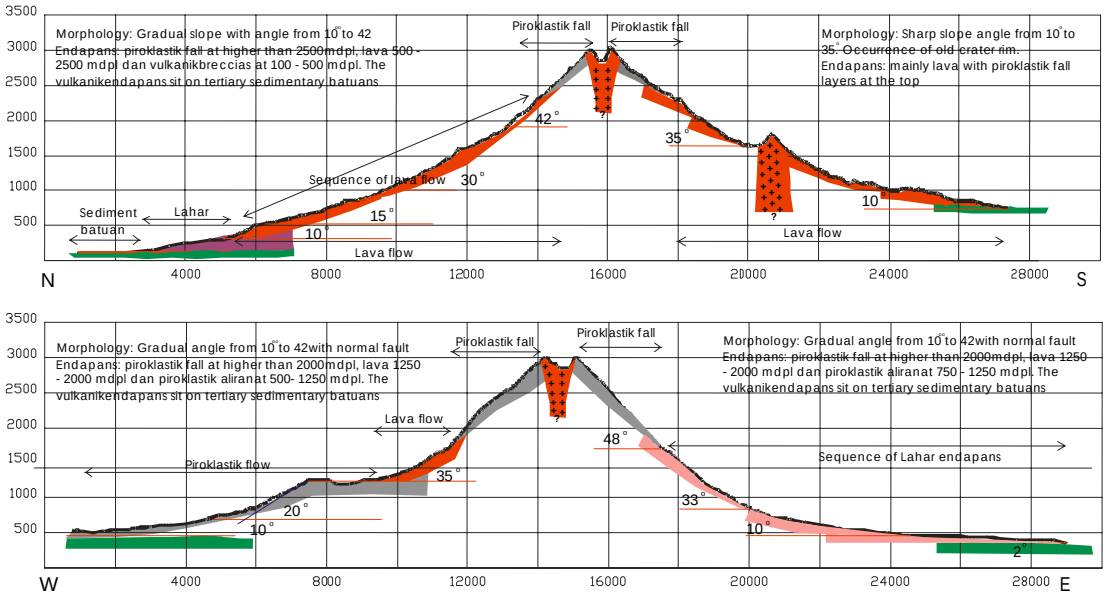
Lebih lanjut, penampang geologi berarah utara-selatan (Gambar 19) memperlihatkan lereng utara-selatan yang landai. Perubahan kemiringan lerengnya yaitu 10°, 15°, 30°, dan 42°. Endapan piroklastik jatuhan terdistribusi pada ketinggian lebih tinggi dari 2500 mdpl, perulangan aliran lava pada elevasi 500–2500 mdpl, dan breksi lahar pada 100 – 500 mdpl. Sebaliknya di lereng selatan dijumpai perubahan kemiringan yang berubah secara tajam yaitu 10° dan 35°. Distribusi endapan gunung api relatif sama dengan lereng utara.

Kemudian pada penampang berarah barat-timur (Gambar 19) memperlihatkan lereng yang landai di bagian barat dengan sudut 10°, 20°, dan 35°, serta adanya indikasi normal fault. Jatuhan piroklastik terdistribusikan pada elevasi 1750-3000 mdpl, aliran lava 1250–1750 mdpl, dan piroklastik aliran pada 750 – 1250 mdpl. Lereng timur memperlihatkan lereng yang landai dengan sudut 2°, 10°, 33°, dan

48°. Pada penampang ini, endapan piroklastik terdapat di elevasi 1750–3000 mdpl dan breksi lahar di 200–1750 mdpl.

3.2.3 Geometri Mata Air

Mata air geometri has been observed on the field. Some air tanah mata air's geometri are relatively visible. Some other mata air's geometri are more difficult to interpret. The difficulties are caused by thick residual soil dan intense vegetation. Other problems are caused by vast water debit itself. Most mata air are forming small pond or lake which covers the mata air points. However, the author proposes 2 types of mata air: depression dan fractured mata air, as follows.

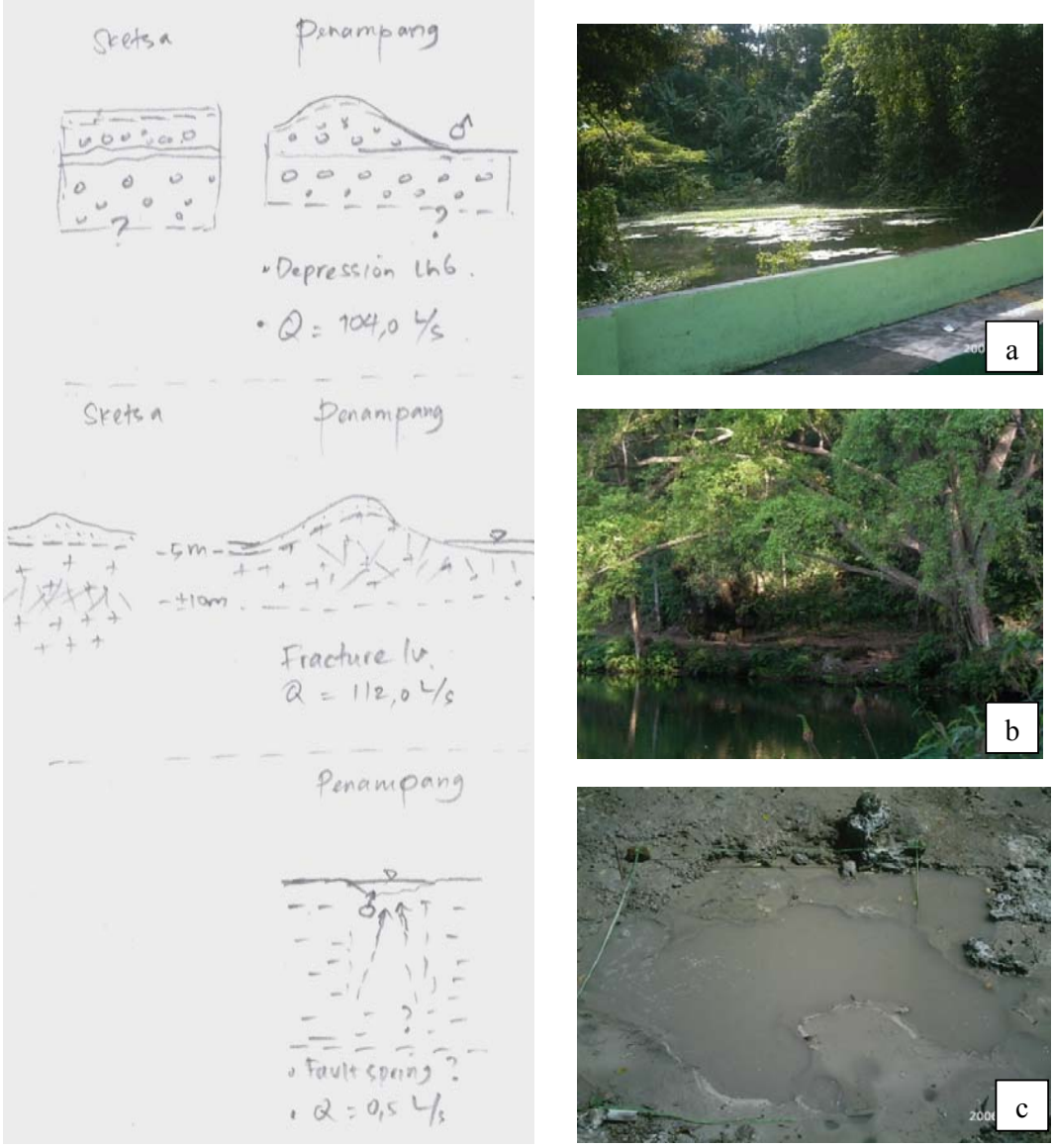


Gambar 19 Penampang geologi Ciremai berarah utara selatan (atas) dan barat-timur (bawah).

A. Mata Air Depresi

Mata air depresi merupakan jenis yang umum muncul di lapangan. Kemunculannya ke permukaan dikendalikan oleh distribusi dan ketebalan tanah pelapukan. Beberapa contoh mata air depresi disajikan pada

Gambar 20, yaitu Cibulan Kec. Cilimus, Telaga Remis, dan Ciuyah Kec. Ciniru.

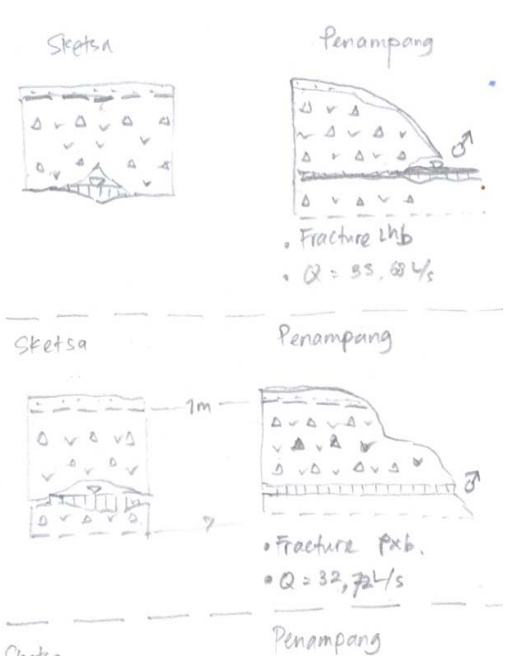


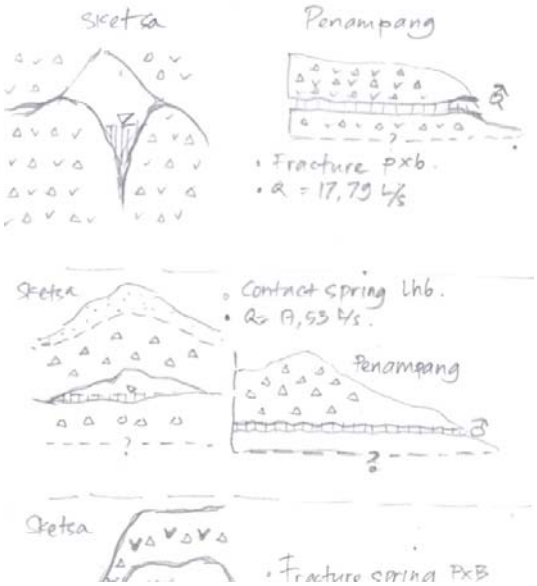
Gambar 20 Interpretative hydrogeological model of: a) Cibulan Kec. Cilimus, b) Telaga Remis, c) Ciuyah Kec. Ciniru

B. Mata Air Rekahan

Mata air rekahan muncul ke permukaan dikendalikan oleh sistem rekahan pada batuan. Beberapa contoh mata air rekahan disampaikan pada

Gambar 21, terdiri dari a) Bandorasa Cigandamekar, b) Cibulakan Kec. Cigugur, c) Palutungan Kec. Cigugur, d) Cibitung Kec. Darma, e) Citutupan Majalengka, f) Cileles Majalengka, g) Jero Kaso Majalengka.




Sketsa
Penampang
• Fracture PxB.
• Q = 17,79 L/s
Sketsa
• Contact spring Lhb.
• Q = 19,53 L/s.
Penampang
Sketsa
• Fracture spring PxB

27/07/2006

g

Gambar 21 Interpretative hydrogeological model of: a) Bandorasa Cigandamekar, b) Cibulakan Kec. Cigugur, c) Palutungan Kec. Cigugur, d) Cibitung Kec. Darma, e) Citutupan Majalengka, f) Cileles Majalengka, g) Jero Kaso Majalengka

3.2.4 Survei Geolistrik

Survei geolistrik dilakukan pada 3 lokasi mata air, yaitu Cibulan, Sangkanurip, dan Ciuyah. Ketiga lokasi tersebut dipilih karena memperlihatkan kondisi geologi yang menarik, selain karena aksesibilitasnya. Mata air Cibulan dipilih karena memiliki fenomena artesis, sedangkan Sangkanurip dan Ciuyah dipilih karena memiliki air panas yang berbeda karakteristiknya. Keduanya memiliki nilai TDS yang berbeda. Ciuyah mengandung TDS yang ekstrim, lebih dari 12.000 ppm pada suhu sekitar 40°C. Pada mata air ini juga bersifat keruh dengan membawa partikel lempung. Sangkanurip memiliki TDS lebih rendah yaitu pada kisaran 2000-3200 ppm dengan temperatur relatif lebih tinggi, yaitu 50°C. Air panas dijumpai di Sangkanurip sangat jernih. Perbedaan tersebut diperkirakan dikendalikan oleh kondisi geologi.

Konfigurasi Wenner dipilih dalam pengukuran dengan jumlah titik sebanyak 5 buah. Kondisi bawah permukaan mata air Cibulan setidaknya memiliki 2 lapisan, yaitu tanah pelapukan dengan ρ berkisar antara 4,18 hingga 95,24 Ω dan endapan gunung api dengan ρ lebih besar dari 168 Ω, diinterpretasikan sebagai breksi lahar. Tanah pelapukan memiliki porositas tinggi dengan kelembaban tinggi, membentuk nilai resistivitas kecil. Ketebalannya maksimum 5 m. Lapisan ini menipis semakin ke arah hulu. Lapisan breksi lahar terletak pada kedalaman 5 hingga 50 m dari permukaan tanah setempat diinterpretasikan memiliki rongga antara fragmen yang cukup besar yang membentuk nilai resistivitas tinggi. Lapisan ini adalah akifer produktif yang mensuplai mata air Cibulan.

Sebanyak 3 titik pengukuran geolistrik telah dilakukan di Sangkanurip dengan konfigurasi Wenner. Data mengindikasikan adanya 4 lapisan, yakni tanah pelapukan dengan ρ berkisar dari 111 hingga 201,7 Ω dan kelompok endapan gunung api dengan ρ bervariasi: 910,2 Ω, 70,9-90,34 Ω, dan 15,5-32,53 Ω. Tanah pelapukan diperkirakan memiliki porositas tinggi dengan kelembaban rendah, diindikasikan oleh kenampakan lapangan dan nilai resistivitas yang relatif lebih rendah dibanding lokasi sebelumnya. Ketebalannya maksimum up to 5 m. Lapisan endapan gunung api terletak pada kedalaman antara 5 sampai 50 m, yang diperkirakan hadir sebagai aliran lava. Lapisan lava pertama memiliki nilai resistivitas yang relatif lebih tinggi sebesar 70,9 hingga 90.34 Ω), dengan ketebalan antara 10 sampai 40 m. Lapisan lava kedua memiliki tahanan jenis sebesar 15,5 sampai 32,53 Ω dengan ketebalan 10-35 m. Lapisan lava pertama diinterpretasikan bersifat lebih impermeabel dibandingkan lapisan kedua. Lapisan ini diperkirakan berfungsi sebagai batuan penutup (*cap rock*) bagi aliran air hipertermal di bagian bawahnya.

Pada lokasi mata air Ciuyah, sebanyak 4 titik telah diuji geolistrik di sekitar mata air. Data pengukuran mengindikasikan adanya2 lapisan endapan: tanah pelapukan dengan nilai tahanan jenis berkisar antara 12,6 to 21,9 Ω dan 2 lapisan formasi batuan sedimen dengan nilai tahanan jenis sangat rendah dari 0,3 sampai 5,63 Ω. Lapisan tanah pelapukan diinterpretasikan memiliki porositas tinggi namun sangat kering. Ketebalannya maksimum 2 m. Formasi batuan sedimen yang diperkirakan tersusun oleh lempung, terletak pada kedalaman 2 m hingga lebih dari 30 m. Nilai tahanan jenisnya kecil. Lapisan lempung pertama terletak pada kedalaman 2 m sampai 20 m dengan nilai tahanan jenis lebih tinggi, yaitu 2,87-5,63 Ω, bila dibandingkan dengan lapisan lempung kedua. Lapisan lempung kedua ini memiliki nilai resistivitas sebesar 0,305 sampai 1,69 Ω, terletak pada kedalaman mulai 20 m atau lebih dalam lagi. Keduanya memiliki air yang sangat asin dengan TDS mencapai 12.000 ppm.

3.2.5 Debit Mata Air

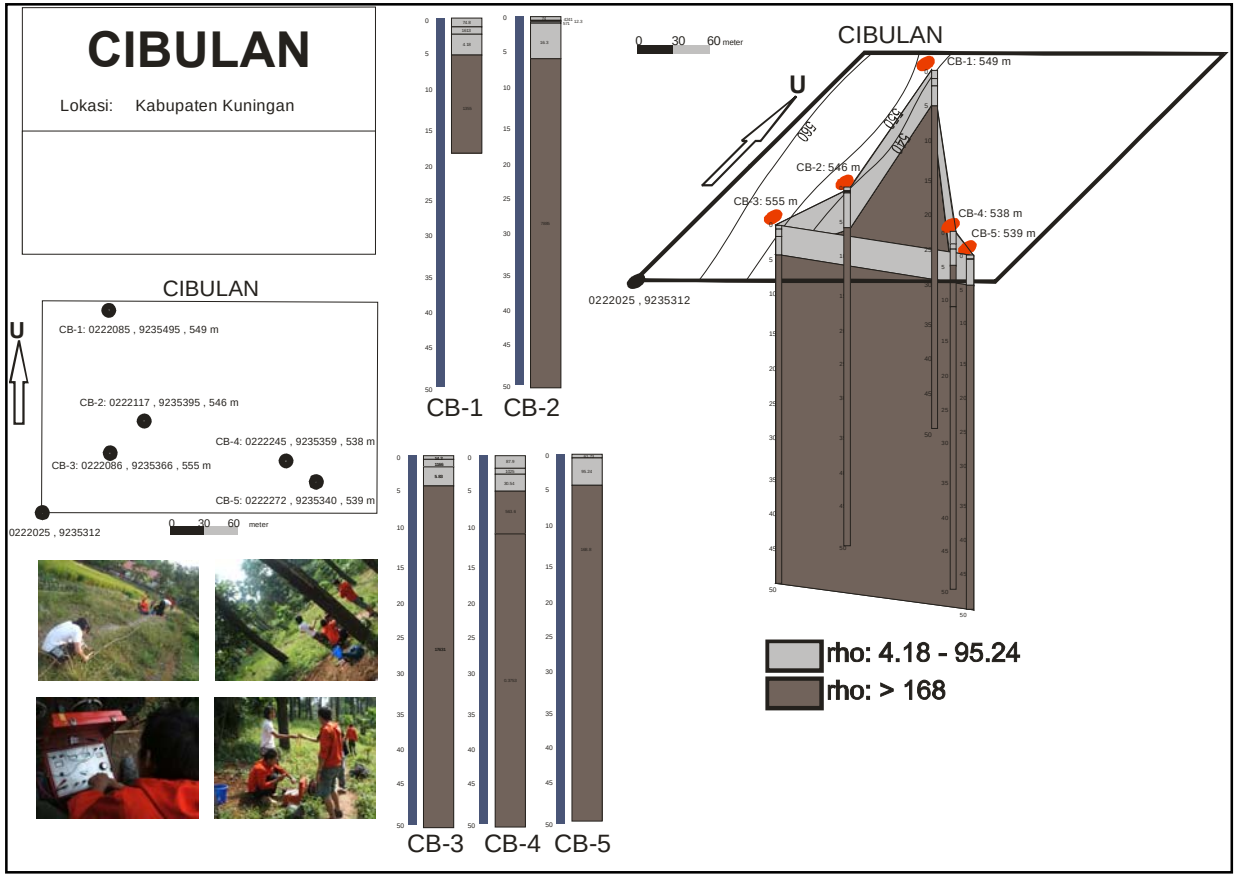
Debit mata air diukur pada 140 lokasi mata air. Pengukuran menggunakan *stopwatch* dan metoda *bucket*. Penulis mengalami kendala dalam mengukur debit

karena besarnya debit dan banyanya keluaran (*outlet*) yang ada. Pada Gambar 25 dapat dilihat bahwa debit berkisar antara 5 L/det hingga 30 L/det. Terdapat debit mata air yang lebih dari 30 L/det. Breksi lahar memiliki rata-rata debit lebih besar, yang kedua adalah lava, dan yg relatif kurang produktif adalah breksi piroklastik dan Formasi Kaliwangu (Gambar 26).

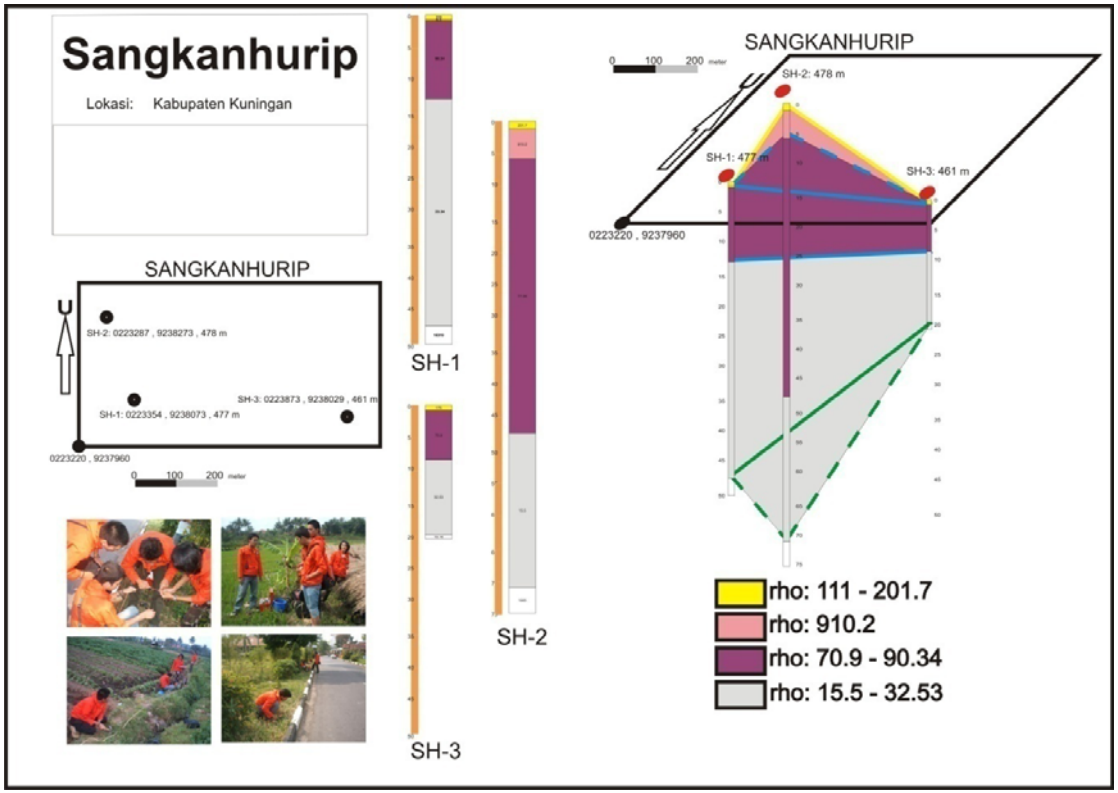
3.2.6 Ketebalan dan Laju Infiltrasi Tanah Pelapukan

Intensitas proses pelapukan di daerah riset sangat tinggi, dicirikan adanya tanah pelapukan yang tebalnya dari 2 m hingga mencapai 10 m. Lapisan setebal itu akan sangat potensial untuk menyimpan dan meresapkan air hujan ke dalam akifer.

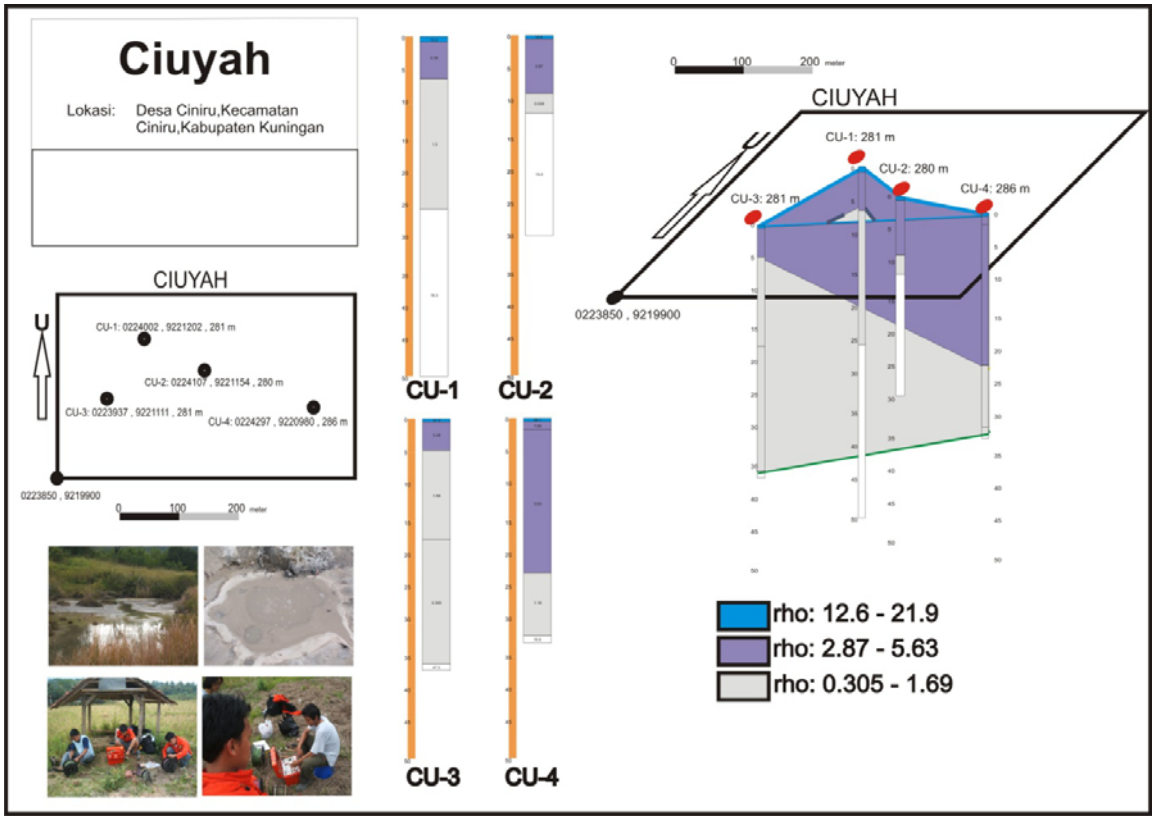
Uji infiltrasi (menurut Chow 1964 dan Miyazaki 1993) telah dilakukan untuk menghitung laju infiltrasi akhir tanah pelapukan. Tanah pelapukan dari lahar menunjukkan nilai laju infiltrasi akhir 1,26 – 2,53 cm/menit, dilanjutkan oleh breksi piroklastik sebesar 1,5 cm/menit, dan aliran lava dengan nilai 0,5 – 1,2 cm/menit. Nilai laju infiltrasi akhir tersebut, menurut Linsley dan Franzini (1978) sebagai indikasi bahwa kapasitas tanah pelapukannya memiliki kapasitas yang cukup untuk peresapan.



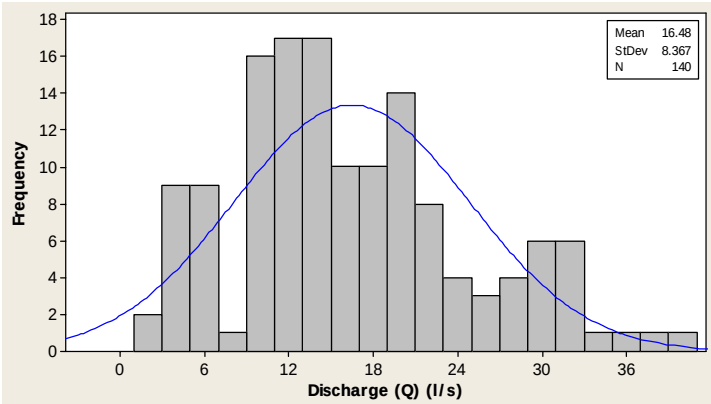
Gambar 22 Interpretasi survei geolistrik di mata air Cibulan



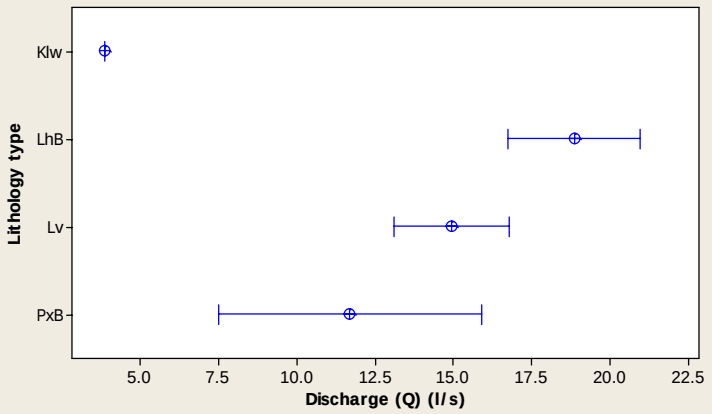
Gambar 23 Interpretasi survei geolistrik di mata air Sangkanurip



Gambar 24 Interpretasi survei geolistrik di mata air Ciuyah



Gambar 25 Histogram debit mata air

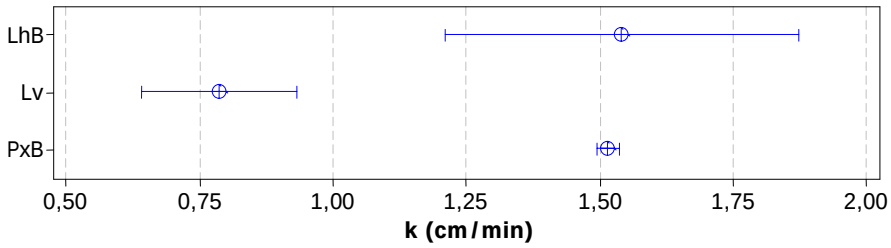


Gambar 26 Interval plot debit mata air berdasarkan litologi

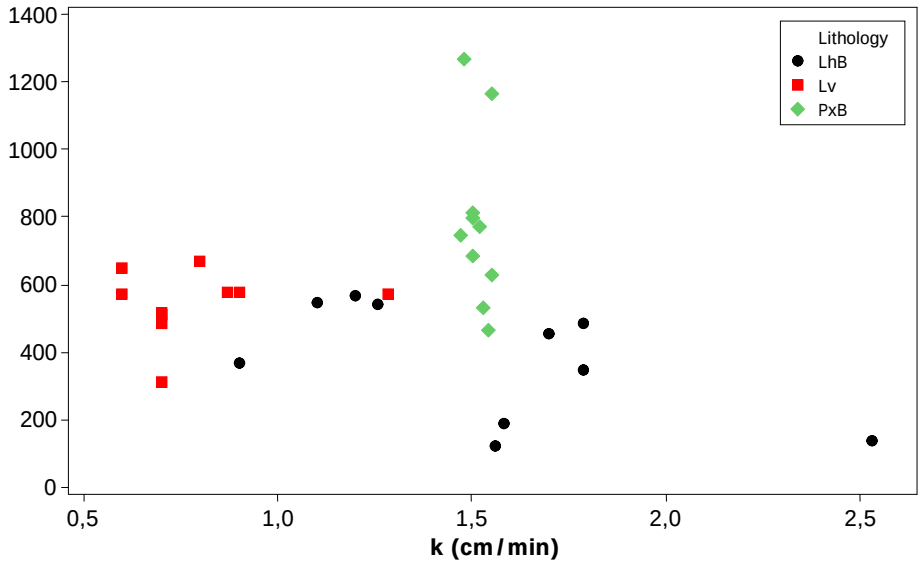
Pengukuran tambahan dilakukan pada tahun 2007. Nilai permeabilitas lapangan tanah pelapukan di daerah riset berkisar antara 0,6 to 2,53 cm/menit dengan rata-rata 1.28 cm/menit (Tabel 13). Berdasarkan Gambar 27, tanah pelapukan breksi lahar (LhB) memiliki kisaran nilai permeabilitas yang paling lebar, sementara tanah pelapukan breksi piroklastik (PxB) yang paling sempit. Faktor ini nampaknya tidak memiliki korelasi/pola distribusi yang teratur pada setiap interval elevasi (lihat Gambar 28).

Tabel 13 Nilai permeabilitas lapangan (cm/menit)

Mata air	Lithology	K (cm/min)	Elevation (mdpl)
Cicurug I	Lv	1,29	573,00
Cicurug II	Lv	0,60	573,00
Sindangparna	Lv	0,87	577,00
Pereng Cigugur	Lv	0,80	667,00
Cigugur	Lv	0,90	577,00
Telaga Remis	Lv	0,70	310,00
MJ.18	Lv	0,70	508,00
MJ.20	Lv	0,60	650,00
MJ.22	Lv	0,70	517,00
MJ.23	Lv	0,70	486,00
Cipaniis	PxB	1,55	1165,00
Kebon Balong	PxB	1,54	466,00
Cibulakan Kadugede	PxB	1,53	530,00
Ciputri	PxB	1,50	815,00
Cikupa	PxB	1,52	770,00
Citiis	PxB	1,55	629,00
Cisarai	PxB	1,47	748,00
Panten Kaler	PxB	1,48	1270,00
MJ.3	PxB	1,50	687,00
MJ.4	PxB	1,50	797,00
Leles	LhB	2,53	135,00
Cibulan Cilimus	LhB	1,10	544,00
Silinggonom	LhB	1,20	568,00
Cipanas Subang	LhB	0,90	367,00
Bandarosa	LhB	1,70	453,00
PDAM Paniis	LhB	1,79	347,00
MJ.1	LhB	1,58	185,00
MJ.2	LhB	1,26	542,00
MJ.6	LhB	1,79	483,00
MJ.8	LhB	1,56	119,00



Gambar 27 Plot interval nilai permeabilitas lapangan. LhB (Breksi lahar), Lv (Lava), PxB (Breksi Piroklastik)



Gambar 28 Plot permeabilitas lapangan terhadap elevation.

3.2.7 Kualitas Air Tanah

Kualitas air tanah telah mulai dianalisis oleh Irawan (2001). Hasilnya mengindikasikan adanya air hujan sebagai sumber air tanah, dengan ciri konduktivitas dan kandungan bikarbonat rendah. Air tanah dapapt dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan kondisi termalnya:

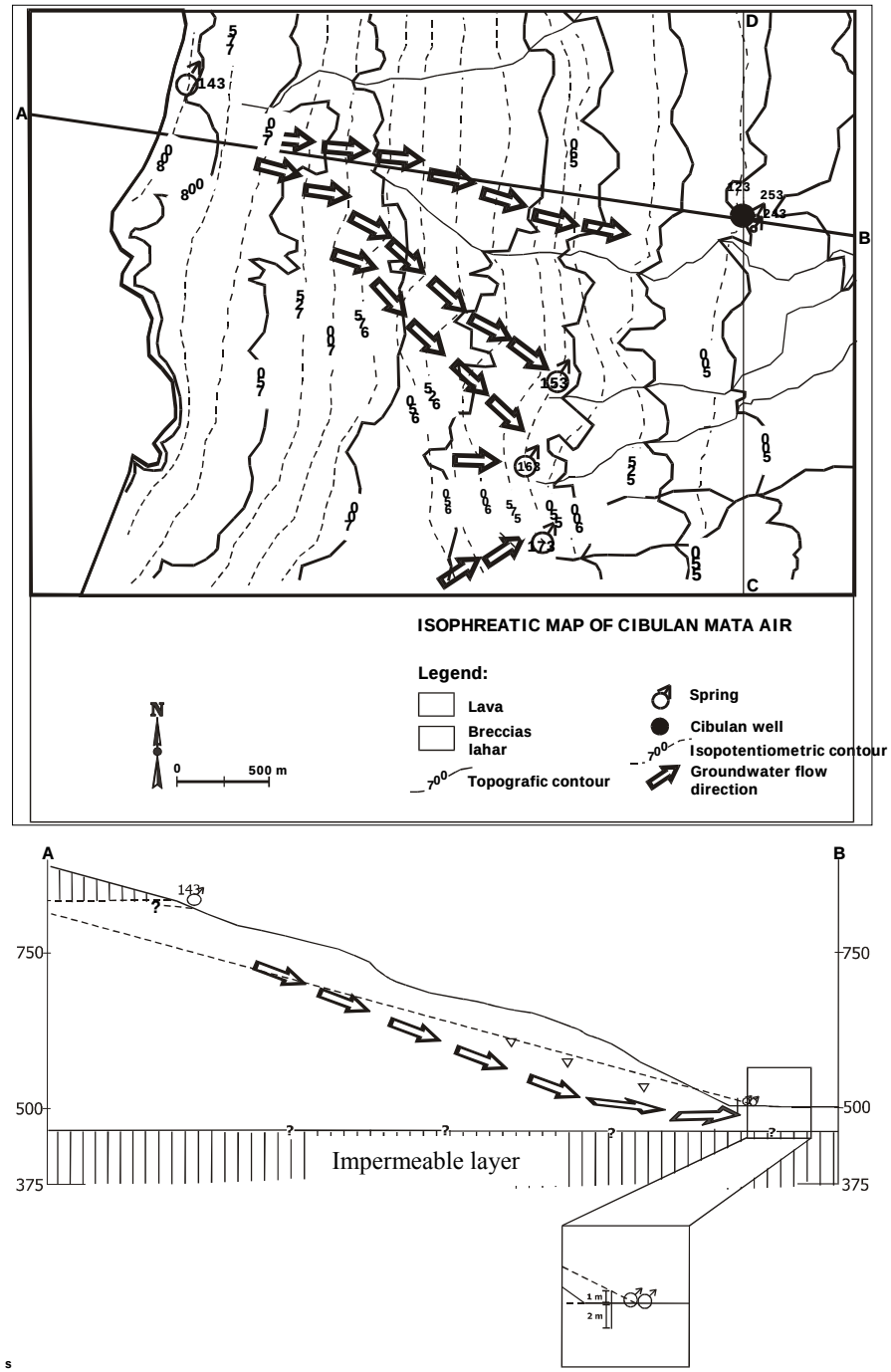
- mesotermal, konduktivitas rendah, kandungan bikarbonat tinggi
- hipotermal, konduktivitas rendah, kandungan bikarbonat
- hipertermik, konduktivitas tinggi, komposisi NaK-bikarbonat.

3.2.8 Pola Aliran Air Tanah

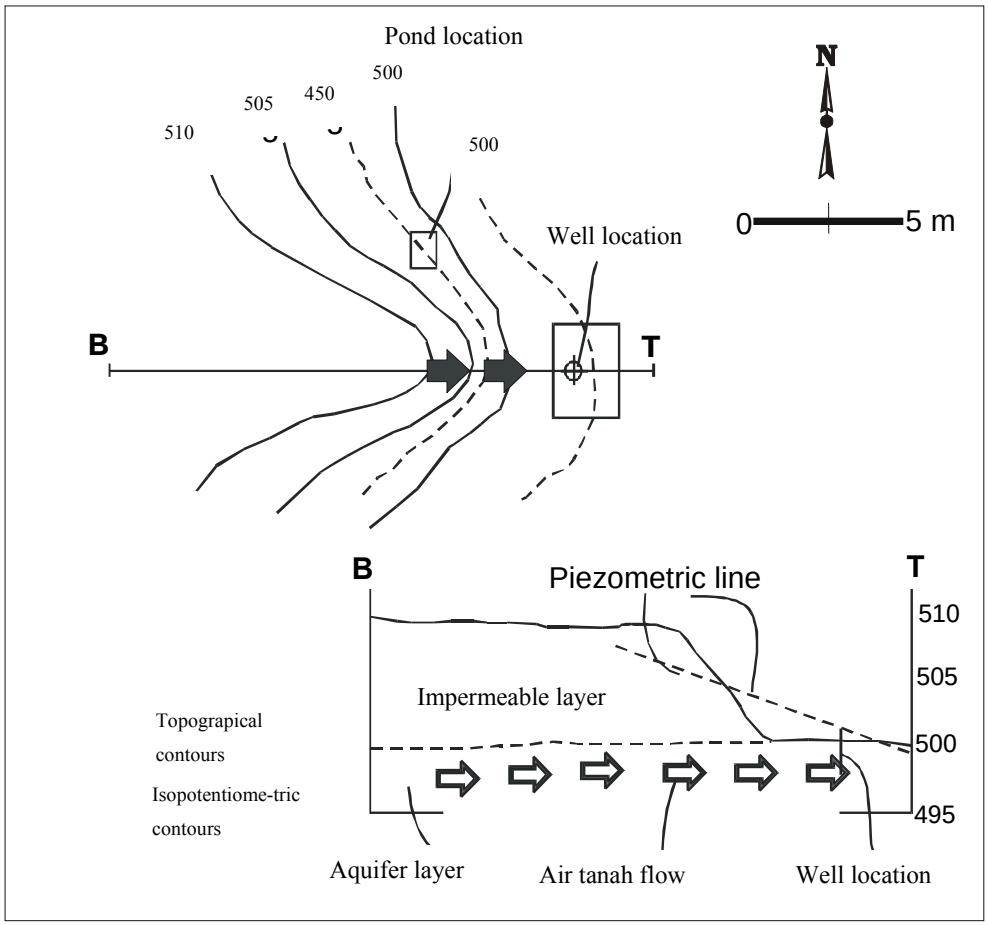
Analisis pola kontur isofreatik mencakup 2 mata air yakni: Linggarjati dan Cibulan. Kawasan mata air Linggarjati muncul dari aliran lava, mengeluarkan debit 80 L/det; sementara mata air Cibulan muncul pada ujung punggungan aliran lava dan mengeluarkan sebit 40 L/det of air tanah.

- Pola aliran air tanah di kawasan Linggarjati adalah SW-NE dengan gradien 0,4 gradien dan 0,6 inklinasi lereng. Aliran tersebut terlihat menyebar (Gambar 29).

- Pola aliran air di Cibulan memperlihatkan arah NW-SE dengan gradien 0,3 gradient dan 0,4 kemiringan lereng. Pola kontur isofreatik memperlihatkan pola garis lurus dari puncuk punggungan ke arah mataair (Gambar 30).



Gambar 29 Pola aliran air tanah di Ciremai (Irawan, 2001)



Gambar 30 Pola aliran air tanah pada contoh kasus Cibulan (Irawan, 2001)

3.3 Catatan

Riset-riset sebelumnya telah mencatat adanya 3 jenis endapan gunung api, terdiri dari breksi lahar, lava, dan breksi piroklastik. Ketiga sistem tersebut menunjukkan kendali rekahan yang dominan. Kelurusan yang teridentifikasi dapat dipisahkan sebagai kelurusan yang terekam pada endapan gunung api dan kelurusan yang terekam pada batuan sedimen. Kelurusan yang terekam pada endapan gunung api memperlihatkan pola radial, sementara kelurusan pada batuan sedimen memperlihatkan pola yang lebih teratur, yaitu NW-SE.

Pola kelurusan tersebut bila dianalisis dengan citra inderaja dan dibantu dengan metoda statistics, diharapkan dapat diketahui sejauh mana jaringan rekahan dapat

mempengaruhi pemunculan mata air. Pemunculan mata air diperkirakan memiliki korelasi dengan densitas kelurusan dan jarak ke kelurusan terdekat. Metodologi ini dapat berkontribusi dalam investigasi hidrogeologi pada sistem akifer media rekahan, khususnya pada endapan gunung api. Namun demikian, analisis kelurusan seringkali bersifat subyektif (Tam et al. 2004).

Dalam skala regional di lereng timur Ciremai terdapat 3 sistem akifer utama, yakni sistem akifer breksi piroklastik, lava, dan breksi lahar. Pola aliran air tanahnya adalah dengan kendali litologi yang dominan. Mata air umumnya muncul pada bagian ujung dari punggungan. Namun demikian, kendali jenis batuan dan struktur geologi yang memerlukan observasi yang lebih rinci.

BAB 4 PARAMETER FISIK DAN KIMIA AIR TANAH

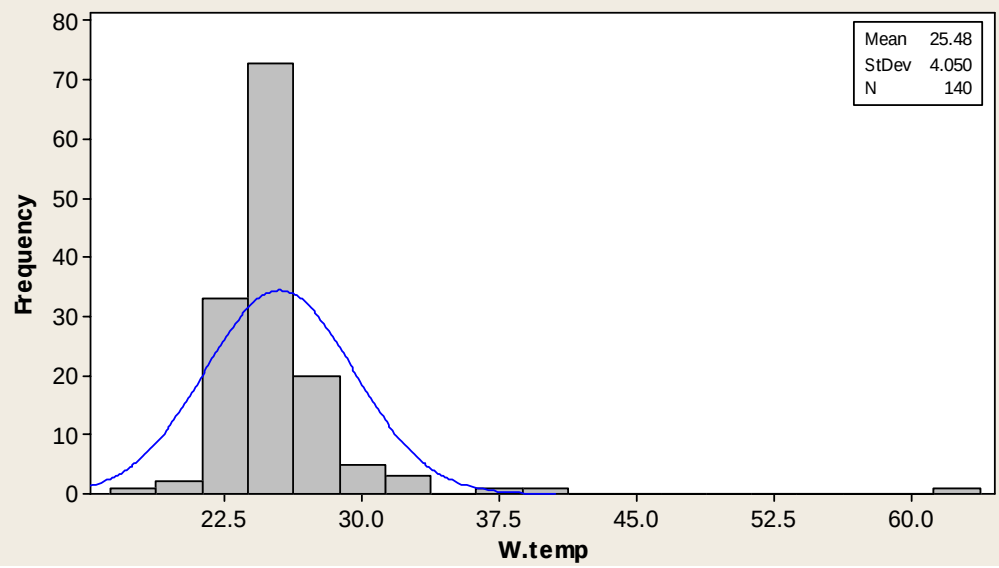
Air tanah muncul ke permukaan dalam bentuk mata air. Dengan demikian, mata air merupakan sarana untuk mengidentifikasi apa yang terjadi pada sistem air tanah (Zhang, et al. 1996). Informasi penting mengenai akifer dapat diketahui dengan mempelajari kuantitas dan kualitas air tanah, sebagaimana dipelajari pada bab ini.

4.1 Parameter fisik

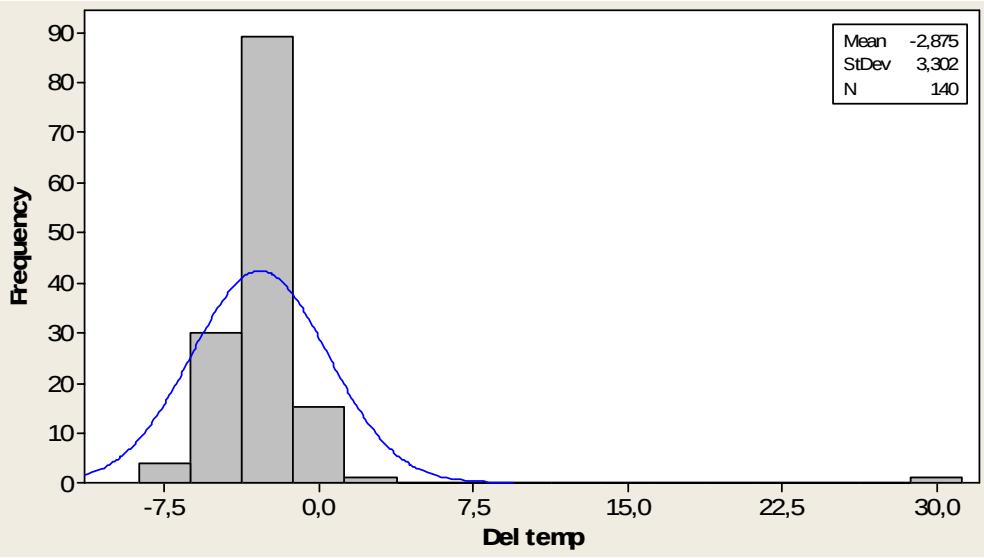
4.1.1 Temperatur

Temperatur air tanah, khususnya dalam akifer tak tertekan, dipengaruhi temperatur udara. Perbedaan yang kecil di antara kedua temperatur tersebut mengindikasikan akifer tak tertekan, sedangkan perbedaan yang besar mengindikasikan adanya aliran air tanah yang lebih dalam. Rata-rata temperatur air tanah adalah 25,48^{o}C, dengan kisaran temperatur yang paling sering muncul adalah 22,5 hingga 25°C sebagaimana diperlihatkan pada histogram Gambar 31.

Selanjutnya Gambar 32 memperlihatkan histogram perbedaan antara temperatur air dengan temperature udara. Nilai positif menunjukkan temperatur air tanah yang lebih tinggi dari temperatur udara, mengindikasikan sistem hipertermal. Sebaliknya nilai negatif menunjukkan temperatur air lebih rendah dari temperatur udara, mengindikasikan sistem hipotermal. Histogram memperlihatkan banyak mata air yang memiliki nilai negatif. Mata air-mata air tersebut berinteraksi dengan udara luar secara terbatas. Terdapat sedikit mata air yang memiliki nilai positif,diklasifikasikan sebagai air hipertermal.



Gambar 31 Histogram temperatur air tanah



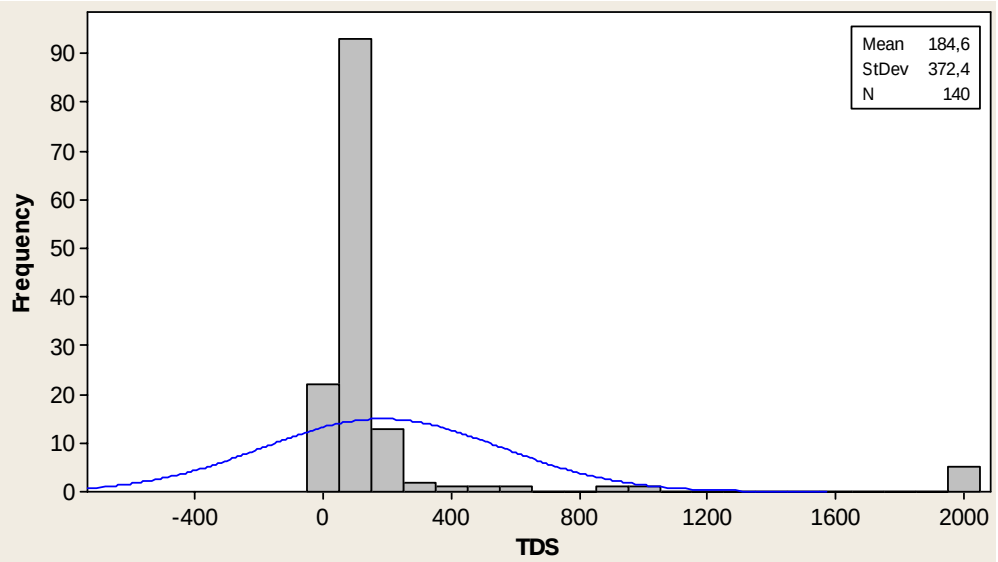
Gambar 32 Histogram perbedaan temperatur antara air dan udara

4.1.2 Total Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solids*)

Total Padatan Terlarut atau *Total Dissolved Solids* (TDS) menunjukkan konsentrasi ion terlarut dalam air. Semakin besar nilainya, maka semakin besar ion yang terlarutnya. Kondisi ini mengindikasikan interaksi antara air tanah dengan akifer yang intensif. Pada sisi lain, semakin kecil nilainya, maka semakin

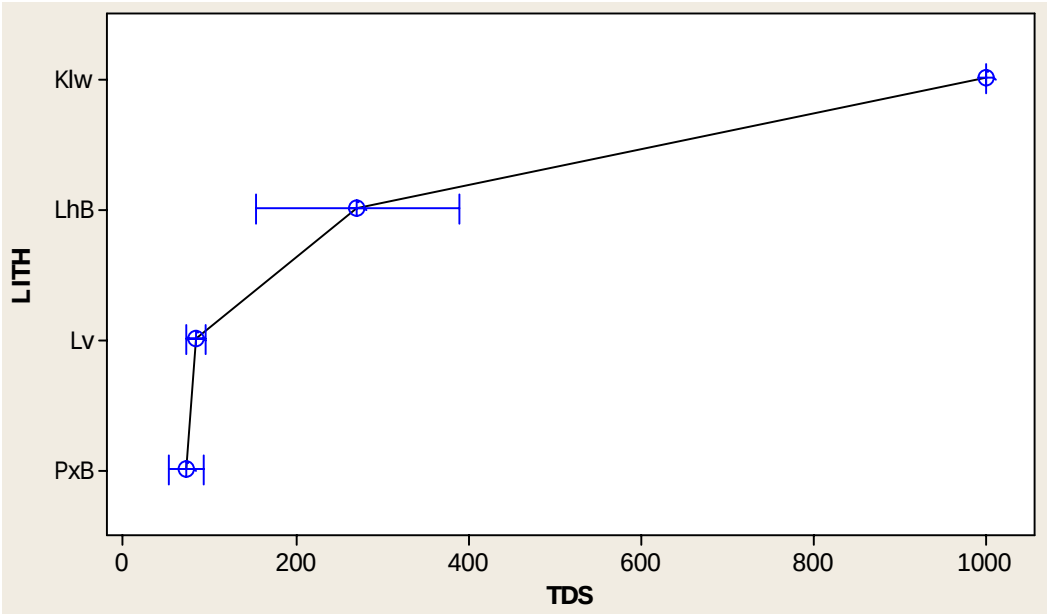
sedikit ion yang terlarut. Tinggi atau rendahnya TDS mengindikasikan pola sistem input-output air tanah. Semakin jauh kawasan imbuhannya atau adanya suhu air yang panas, maka akan semakin besar nilai TDSnya.

Rata-rata TDS adalah 184,6 ppm dengan kisaran nilai yang sering muncul adalah 50 hingga 200 ppm (Gambar33), sebagai indikasi jenis air meteorik. Hanya sedikit mata air yang memiliki nilai TDS lebih dari 200 ppm. Sebagai contoh, mata air Ciuyah memiliki nilai TDS mendekati 12.000 ppm. Nilai TDS yang tinggi menjadi indikasi jaraknya yang jauh dari air meteorik. Sebaliknya, nilai TDS air tanah yang rendah dapat diinterpretasikan asal mulanya dari air meteorik.



Gambar33 Histogram nilai Total Padatan Terlarut (TDS)

Untuk memperlihatkan kisaran nilai TDS berdasarkan jenis litologi, penulis telah membuat plot interval pada Gambar 34. Dari gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa air tanah di Formasi Kaliwangu mengandung TDS tertinggi, dilanjutkan oleh air tanah di breksi lahar, dan breksi piroklastik. Bila dikaitkan dengan ketinggian mata air, maka semakin rendah elevasi mata air akan semain besar pula TDS nya.

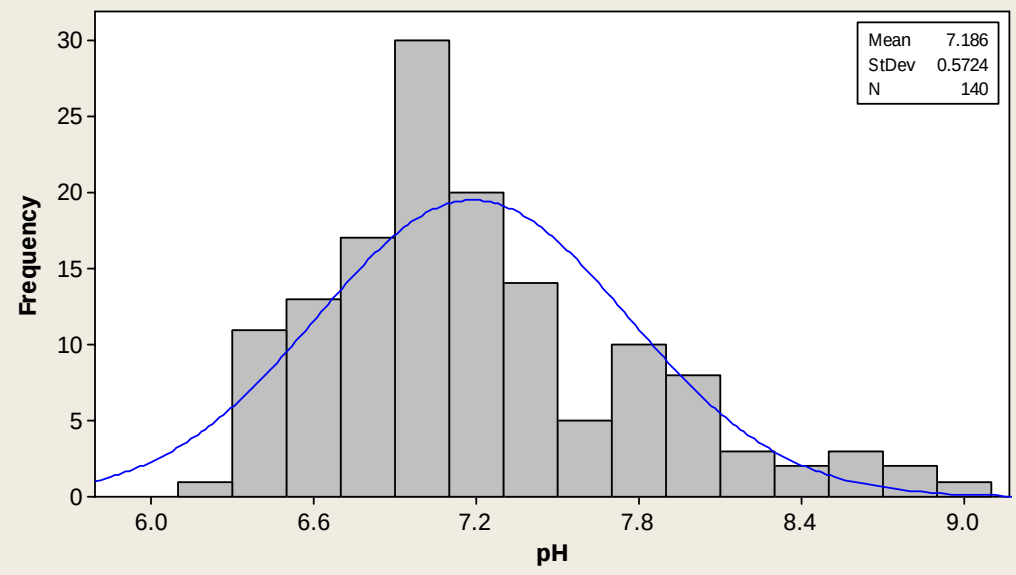


Gambar 34 Plot interval TDS berdasarkan jenis batuan. Breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.1.3 pH

Pengukuran pH merupakan bagian penting dalam menggali informasi mengenai air tanah. Umumnya nilai pH bervariasi dari 6 hingga 8,5. Namun pH lebih kecil dari 6 sangat umum dijumpai pada air hipertermal (air panas). Nilai pH lebih besar dari 9 adalah anomaly, namun menurut Hem (1980), air dengan pH 11,6 dan 12,0 dijumpai di AS sebagai hasil reaksi antara air meteorik dengan batuan ultrabasa, misalnya serpentinite.

Hasil pengukuran pH di daerah penelitian menghasilkan kisaran 6-9 dengan rata-rata 7,1 (Gambar 35). Nilai yang sering muncul adalah 7 sampai 7.2. Plot interval pH berdasarkan jenis batuan dapat dilihat pada Gambar 34. Pada gambar tersebut terlihat bahwa air tanah pada Formasi Kaliwangu memiliki pH paling rendah, yaitu 6,7. Air tanah pada breksi lahar dan lava memiliki pH menengah. Breksi piroklastik memiliki pH tertinggi, sebesar 7,3.



Gambar 35 Histogram pH

4.2 Parameter kimia

4.2.1 Kalsium (Ca^{2+})

Kalsium (Ca) merupakan unsure penyusun penting pada mineral batuan beku, khususnya silikat piroksen dan ampfibol, serta feldspar. Contoh mineral yang umum dijumpai adalah anortit ($CaAl_2Si_2O_8$). Reaksi antara anortit dengan air akan menghasilkan aluminium silikat dan ion kalsium bebas, sebagaimana reaksi berikut ini:

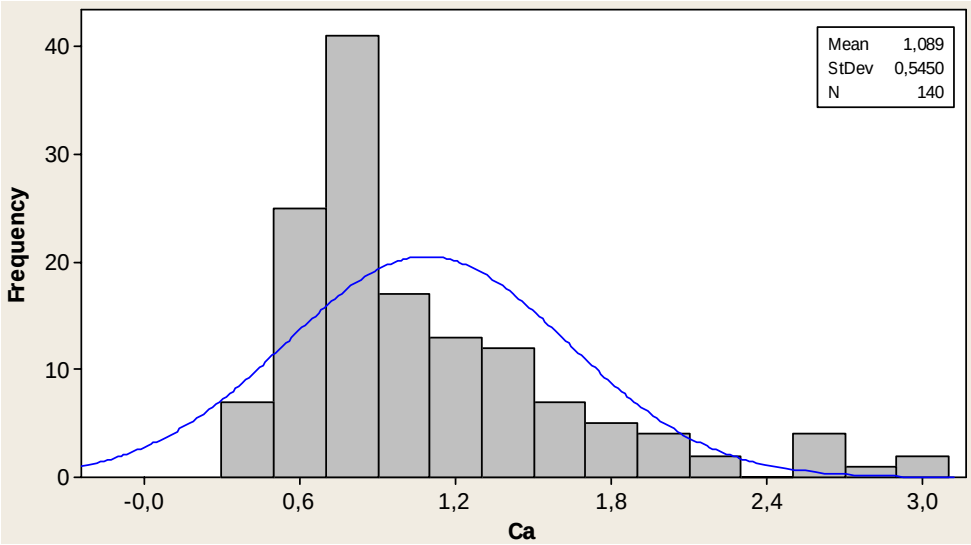
$$CaAl_2Si_2O_8 + H_2O + 2H^+ = Al_2Si_2O_5(OH)_4 + \mathbf{Ca^{2+}}$$

Pada batuan sedimen umumnya kalsium hadir sebagai karbonat dalam bentuk kalsit dan aragonit, keduanya memiliki rumus kimia $CaCO_3$, serta dolomite dengan rumus kimia $CaMg(CO_3)_2$. Mineral kalsium lainnya adalah gipsum ($CaSO_4.2H_2O$) dan fluorit (CaF_2). Ca adalah juga komponen penyusun zeolit dan montmorilonit. Pada batupasir dan batuan detritus lainnya, Ca hadir sebagai semen kalsit. Tabel 14 berikut ini memperlihatkan perbandingan kandungan kalsium pada batuan dan air tanah.

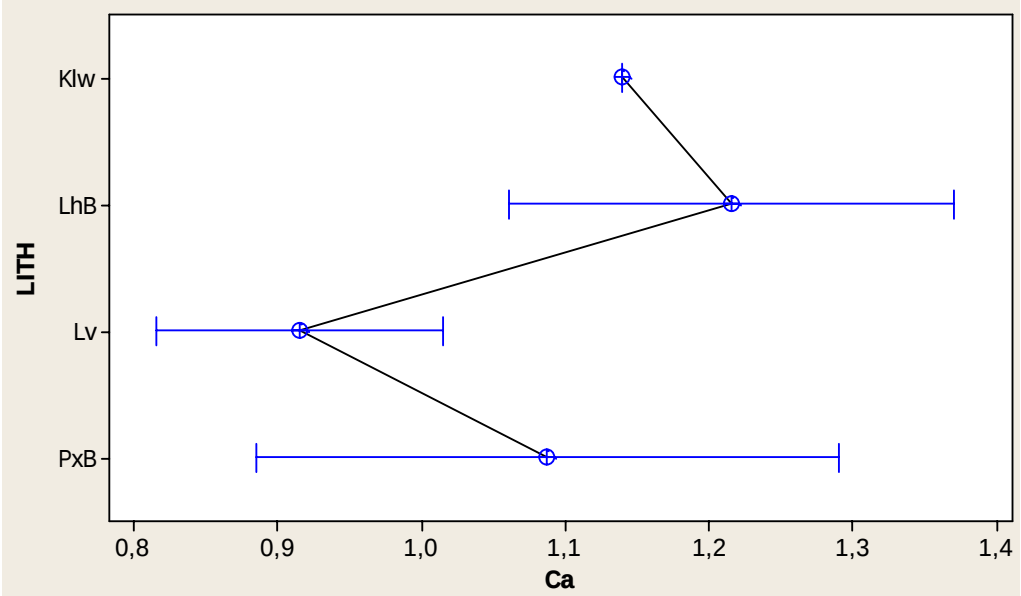
Tabel 14 Perbandingan kandungan kalsium pada batuan dan air tanah

No	Contoh	Unsur	Rata-rata	Kisaran
1	Contoh batuan (5 contoh)	CaO (%)	7,2	6,8-7,9
2	Contoh air tanah (140 contoh)	Ca^{2+} (meq/L)	0,96	0,2-1,8

Kandungan kalsium dalam air tanah rata-rata adalah 0,96 meq/L, dengan kisaran dari 0,2 hingga 1,8 meq/L, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar36. Plot interval of kalsium berdasarkan jenis batuan memperlihatkan Formasi Kaliwangu has the moderate kalsium, 1,2 meq/L, breksi lahar antara 1 – 1,8 meq/L, lava kisarannya 0,3 hingga 0,82 meq/L, dan breksi piroklastik berkisar antara 0,46 – 1,58 meq/L (Gambar37).



Gambar36 Histogram konsentrasi Ca^{2+} dalam meq/L



Gambar37 Plot interval konsentrasi Ca^{2+} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.2.2 Magnesium (Mg^{2+})

Magnesium (Mg) adalah logam alkali tanah yang merupakan penyusun utama mineal ferromagnesian, termasuk didalamnya adalah: olivin, piroksen, amfibole, dan mika. Unsur ini pada batuan sedimen juga hadir dalam bentuk dolomite. Contoh reaksi alterasi olivin magnesium menjadi serpentinit adalah sebagai berikut:

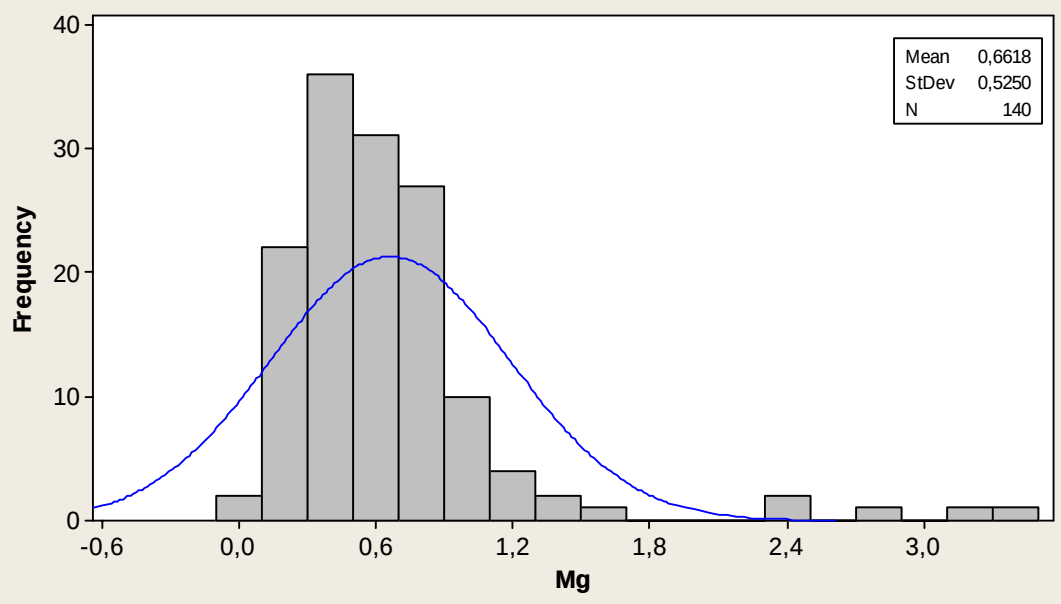
$$5Mg_2SiO_4 + 8H^+ + 2H_2O = Mg_6(OH)_8Si_4O10 + \mathbf{4Mg^{2+}} + H_4SiO_4$$

Tabel berikut ini menggambarkan komparasi kandungan magnesium pada air tanah dan batuan.

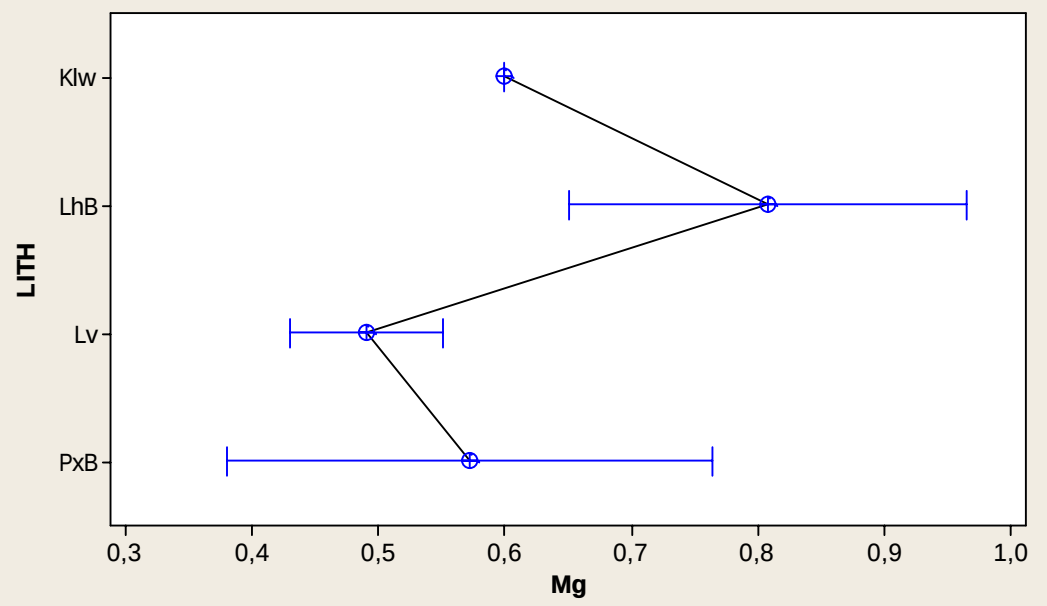
Tabel 15 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia

No	Contoh	Unsur	Rata-rata	Kisaran
1	Contoh batuan (5 contoh)	MgO (%)	3.7	3.4 - 4.2
2	Contoh air tanah (140 contoh)	Mg^{2+} (meq/L)	0.66	0.1-3

Komposisi magnesium pada contoh air tanah di daerah kajian berkisar dari 0,1 hingga lebih dari 3 meq/L dengan rata-rata 0,66 meq/L (Gambar 38). Beberapa mata air mengandung magnesium lebih dari 1,8 meq/L. Kandungan magnesium pada air tanah yang bersirkulasi pada Formasi Kaliwangu sebesar 0,6 meq/L, pada breksi lahar 0,65 – 0,98 meq/L, pada lava dari 0,44 hingga 0,55 meq/L, sementara pada breksi piroklastik dari 0,38 sampai 0,77 meq/L (Gambar 39). Data-data tersebut memiliki komunalitas 95%. Mata air mata air dengan kandungan magnesium lebih dari 1,8 meq/L ditetapkan sebagai anomali. Seluruhnya muncul pada batuan breksi lahar.



Gambar 38 Histogram komposisi Mg^{2+} dalam meq/L



Gambar 39 Plot interval konsentrasi Mg^{2+} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.2.3 Natrium (Na^{+})

Natrium (Na) merupakan anggota grup alkali tanah yang terdapat paling banyak di alam. Dalam batuan beku, natrium sedikit lebih banyak dibanding kalium, sebaliknya pada batuan sedimen kandungan natriumnya sedikit. Menurut Hem (1980), kandungan natrium pada batuan beku dalam muncul dari:

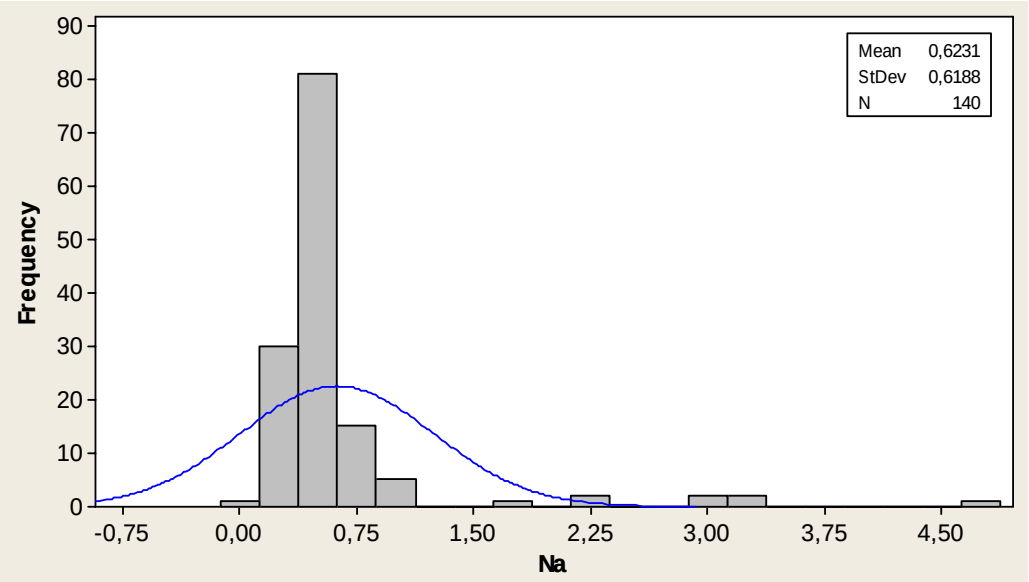
- mineral albit dengan rumus $NaAlSi_3O_8$
- pertukaran kation kalium oleh natrium pada mineral ortoklas dan mikroklin
- formasi mengandung evaporite ($NaSO_4$)
- material semen pada batuan sedimen

Tabel berikut ini memperlihatkan perbandingan antara komposisi natrium pada air tanah dan batuan. Rata-rata kandungan natrium pada batuan dalam bentuk Na2O

adalah 3,2%, sedangkan natrium yang larut dalam air tanah rata-ratanya 0,62 meq/L dengan kisaran antara 0,04 to more than 4,5 meq/L (lihat juga Gambar 40).

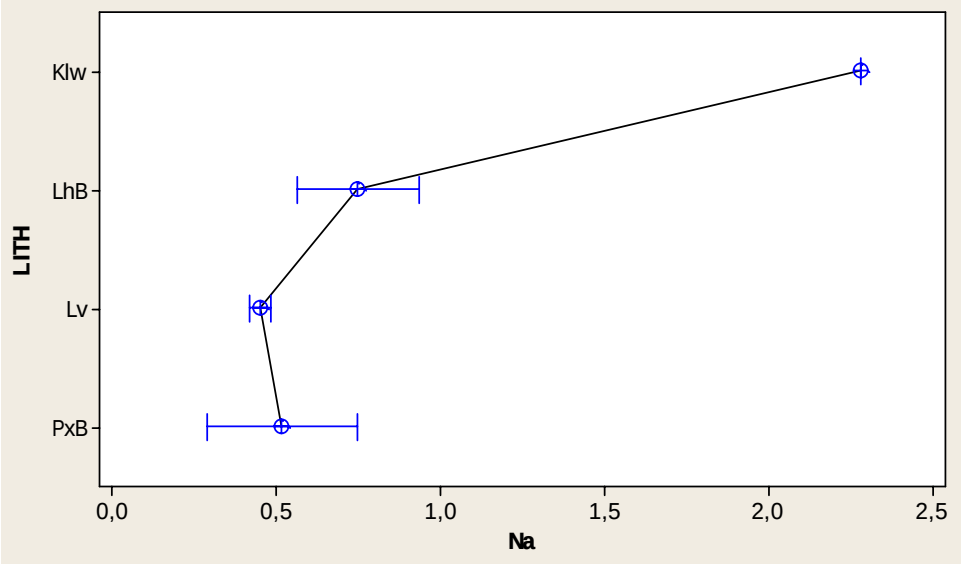
Tabel 16 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia

No	Contoh	Unsur	Rata-rata	Kisaran
1	Contoh batuan (5 contoh)	Na_2O (%)	3,2	3-3,7
2	Contoh air tanah (140 contoh)	Na^{2+} (meq/L)	0,62	0,04-4,64



Gambar 40 Histogram komposisi Na^+ dalam meq/L

Plot interval konsentrasi natrium terhadap 95% komunal contoh memperlihatkan rata-rata natrium di Formasi Kaliwangu adalah 2,3 meq/L. Rata-rata ini lebih tinggi dari yang ada dalam breksi lahar sebesar 0,7 meq/L, lava sebesar 0,45 meq/L, dan breksi piroklastik sebesar 0,5 meq/L (Gambar 41).



Gambar 41 Plot interval konsentrasi Na^+ (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.2.4 Kalium (K^+)

Keterdapatan kalium pada batuan beku lebih sedikit dari natrium namun lebih tinggi pada batuan sedimen. Kalium lebih sulit untuk dipisahkan dari ikatan silikatnya dibandingkan dengan natrium. Kalium juga cenderung untuk berikatan dengan produk pelapukan, khususnya pada beberapa jenis mineral lempung (Hem, 1980). Sumber penyumbang kalium dalam air tanah dapat berupa (Hem, 1980):

- batuan kaya silikat, dalam bentuk mineral felspar ortoklas dan mikroklin ($KAlSi_3O_8$), mineral mika dan leusit felspatoid ($KAlSi_2O_6$).
- mineral felspar dan partikel mika yang menjadi semen atau mineral illit serta mineral lempung lainnya.
- batuan evaporit, yang dapat mengandung lapisan garam kalium.

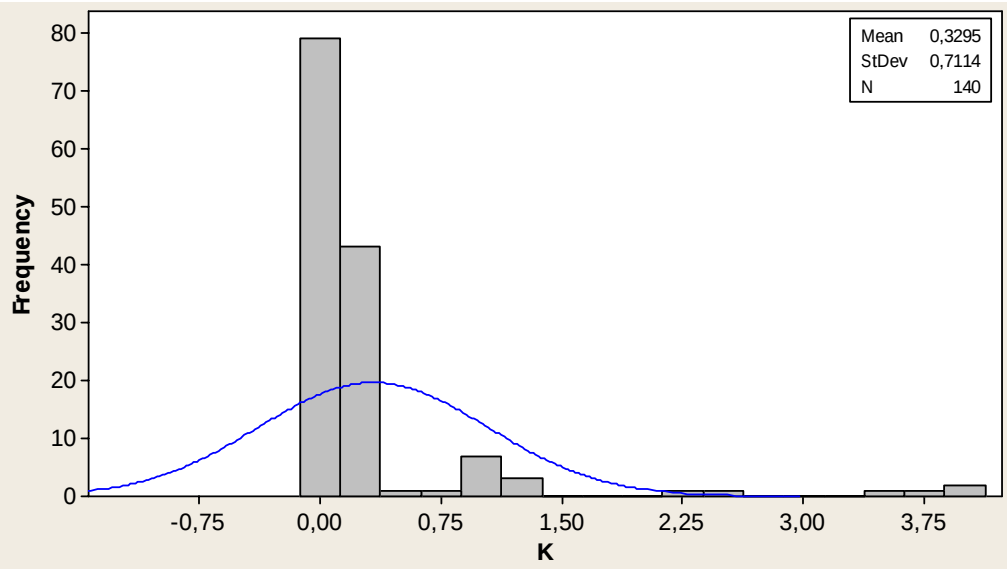
Menurut Hem (1980), dalam air meteorik konsentrasi kalium umumnya ½ atau 1/10 konsentrasi natrium. Atau dalam bentuk lain, rasio Na/K adalah 2 hingga 10. Konsentrasi kalium lebih dari belasan mg/L umumnya ada pada air hipertermal.

Tabel berikut ini memperlihatkan perbandingan komposisi natrium pada air tanah dan batuan.

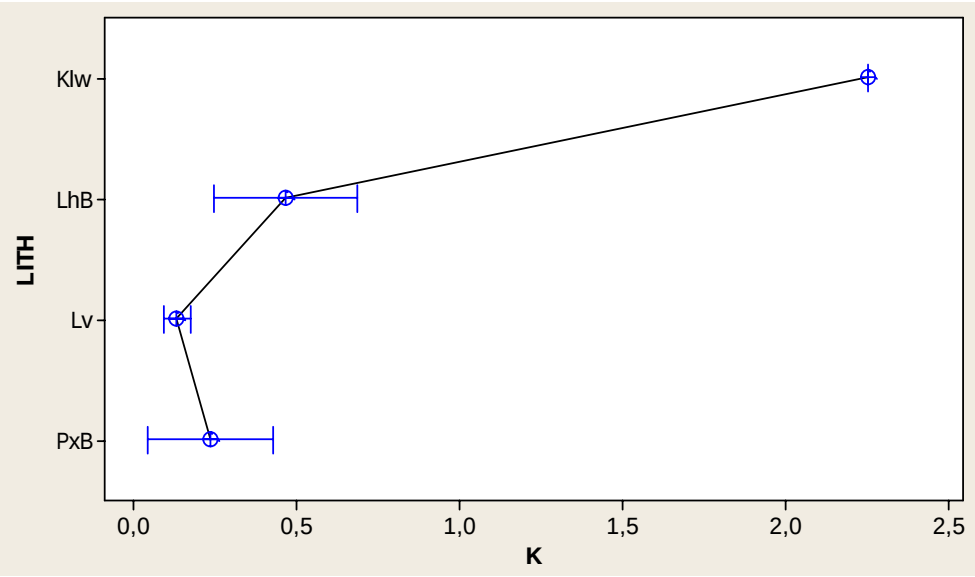
Tabel 17 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia

No	Contoh	Unsur	Rata-rata	Kisaran
1	Contoh batuan (5 contoh)	K_2O (%)	0.33	0.02-4.12
2	Contoh air tanah (140 contoh)	K^+ (meq/L)	1.1	0.9-1.4

Konstrasi kalium rata-rata pada contoh air tanah di daerah studi adalah 0,33 meq/L, dengan kisaran dari 0,02 hingga 3 meq/L (Gambar 42). Jumlah tertinggi adalah contoh dengan konsentrasi kalium antara 0,2 sampai 0,3 meq/L. Plot interval of kalium berdasarkan jenis batuan pada Gambar 43 memperlihatkan rata-rata pada Formasi Kaliwangu sebesar 2,4 meq/L, breksi lahar sebesar 0,5 meq/L, lava sebesar 0,1 meq/L, dan breksi piroklastik sebesar 0,3 meq/L.



Gambar 42 Histogram komposisi K^+ dalam meq/L



Gambar 43 Plot interval konsentrasi K^+ (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.2.5 Klorida (Cl^-)

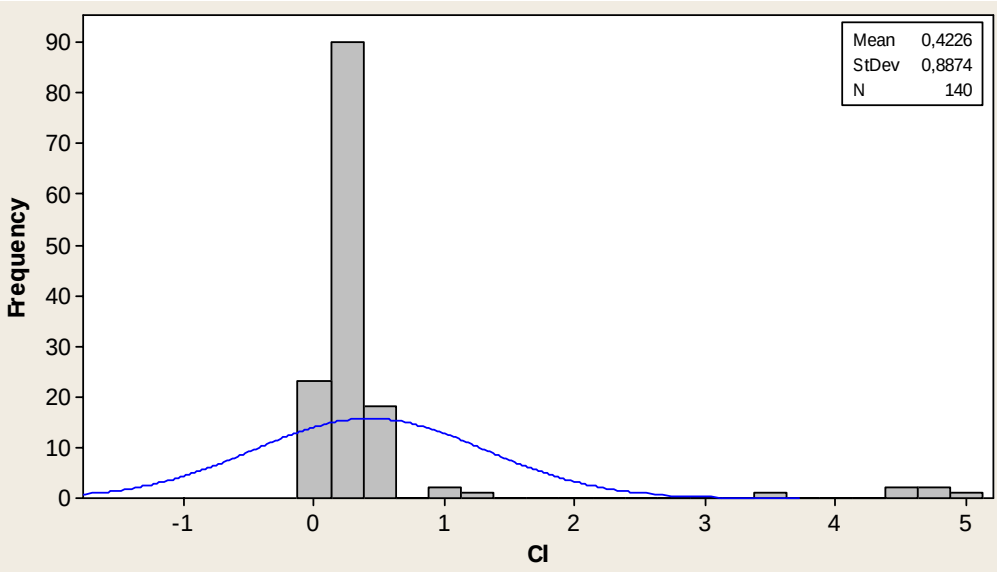
Klorida terdapat di segala jenis air meteorik dalam konsentrasi rendah. Konsentrasinya lebih renda dibanding sulfat atau bikarbonat. Klorida merupakan unsur golongan halogen yang paling banyak keterdapatannya di alam. Unsur ini mudah berikatan dengan unsur lainnya, misalnya unsur golongan logam, alkali, dan alkali tanah. Senyawa bentukannya larut di dalam air. Unsur yang paling mudah berpasangan dengan klorida adalah natrium.

Beberapa mineral batuan beku yang mengandung klorida antara lain felspatoid sodalit dengan rumus kimia $Na_8[Cl_2(AlSi_4O)_6$. Klorida dapat hadir sebagai resistat sebagai pada air konat dan semen pada batuan sedimen. Sedimen halus seperti lempung dan serpih dapat menyimpan unsur klorida yang terlarut dalam air konat/air formasi dalam waktu yang lama.

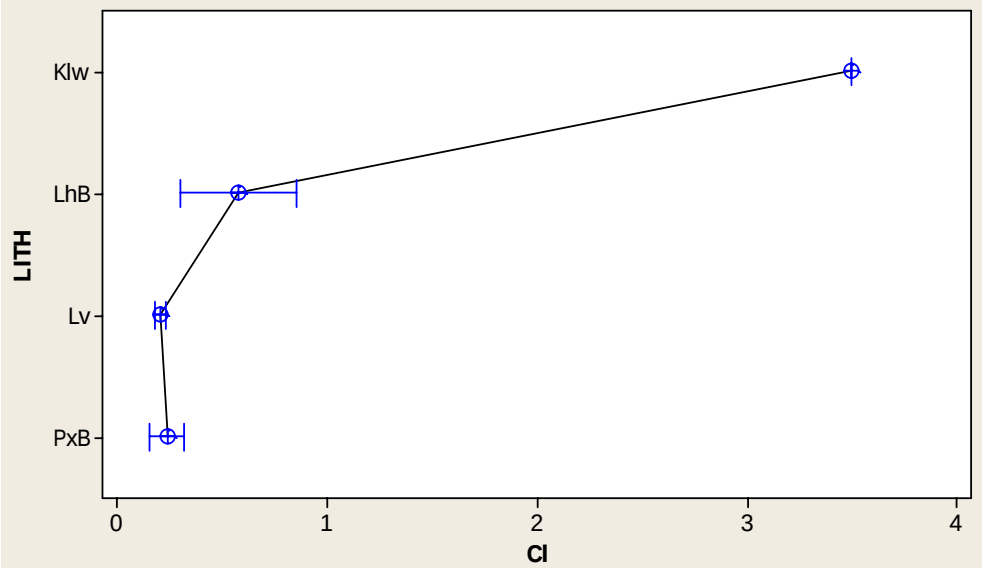
Tabel 18 Comparison between batuan kimia dan air tanah kimia

No	Contoh	Unsur	Rata-rata	Kisaran
1	Contoh batuan (5 contoh)	MgO (%)	3.7	3.4-4.2
2	Contoh air tanah (140 contoh)	Ca^{2+} (meq/L)	1.09	0.4-2.9

Rata-rata klorida pada contoh yang diuji adalah 0,42 meq/L, dengan kisaran dari 0,1 sampai 5 meq/L (see Gambar 44). Jumlah contoh terbanyak memiliki konsentrasi klorida 0,3 sampai 0,5 meq/L. Plot interval berdasarkan jenis batuan pada Gambar 45 menunjukkan bahwa Formasi Kaliwangu memiliki rata-rata konsentrasi tertinggi yaitu 3,5 meq/L, breksi lahar sebesar 0,6 meq/L, lava dan breksi piroklastik sebesar masing-masing 0,3 meq/L.



Gambar 44 Histogram komposisi Cl^- dalam meq/L



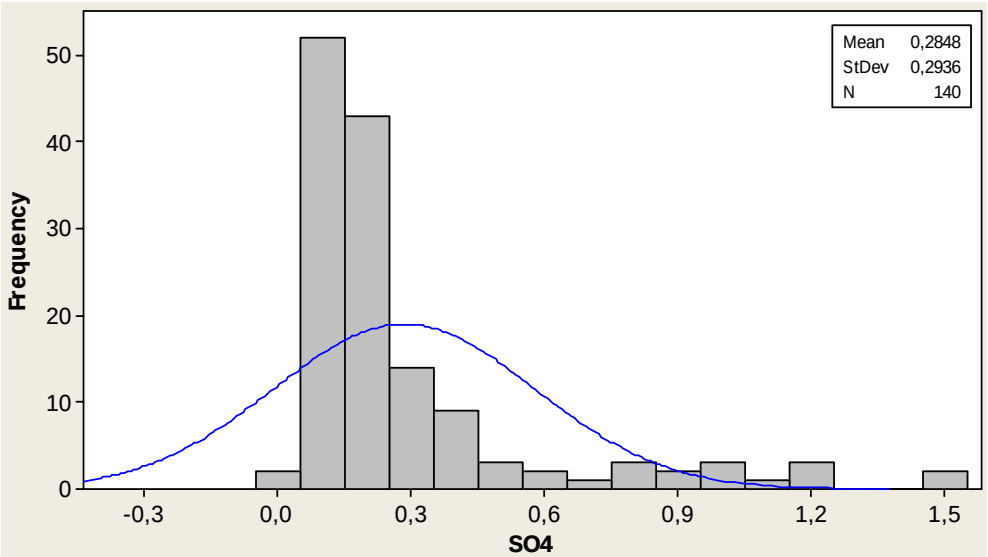
Gambar 45 Plot interval konsentrasi Cl^- (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.2.6 Sulfat (SO_4^{2-})

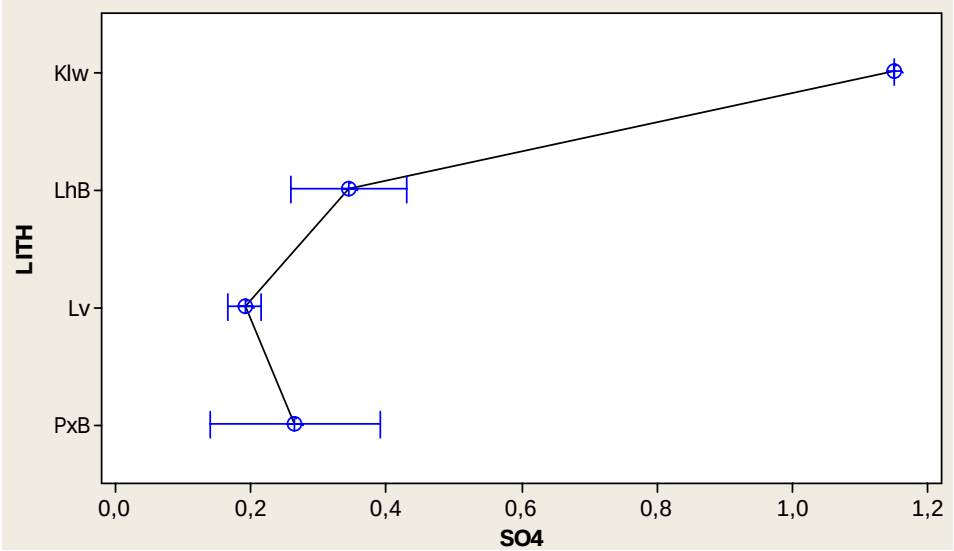
Unsur sulfur terdapat pada batuan beku dan sedimen dalam bentuk mineral sulfida. Bila mineral ini mengalami pelapukan dan kontak denan air, sulfur akan teroksidasi menjadi ions sulfat yang kemudian larut di dalam air. Konsentrasi sulfur dalam bentuk gas akan tinggi pada air geotermal. Pada batuan beku, sulfat berasal dari:

- Kelompok felspatoid
- Sedimen evaporit berupa gipsum ($CaSO_4.2H_2O$) atau anhidrit
- Mineral sulfida seperti pirit, kalkopirit.

Rata-rata sulfat dalam contoh yang diuji adalah 0,28 meq/L, dengan kisaran dari 0,1 sampai 1,2 meq/L (Gambar 46). Contoh air tanah pada Formasi Kaliwangu memiliki rata-rata kandungan sulfat tertinggi, yakni 1.2 meq/L, breksi lahar sebesar 0,35 meq/L, lava sebesar 0,2 meq/L, dan breksi piroklastik sebesar 0,3 meq/L sebagaimana disampaikan pada Gambar 47.



Gambar 46 Histogram komposisi SO_4^{2-} dalam meq/L



Gambar 47 Plot interval konsentrasi SO_4^{2-} (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

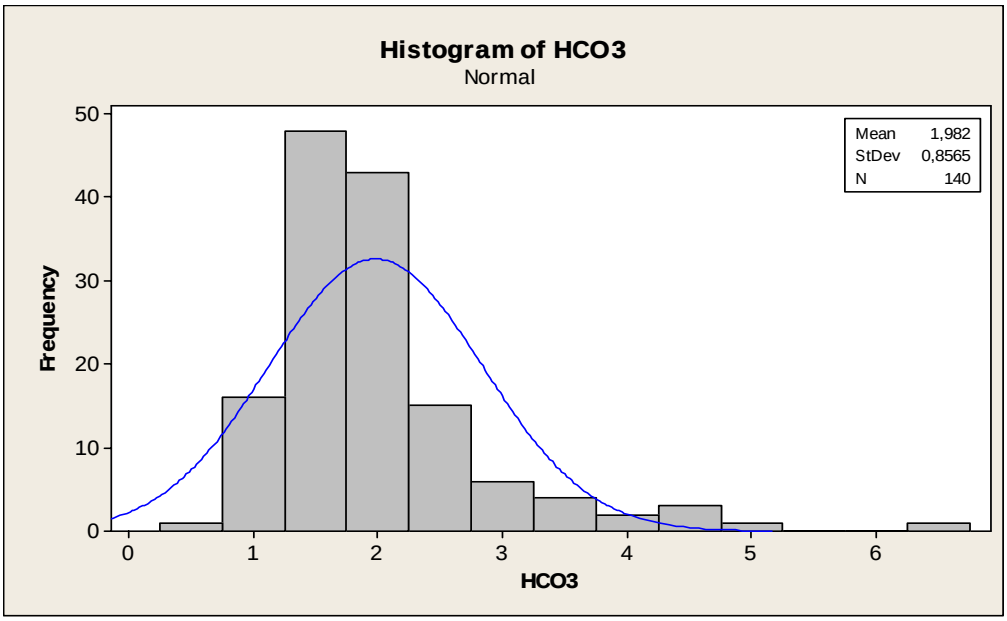
4.2.7 Bikarbonat (HCO_3^-)

Tanah pelapukan pada daerah beriklim lembab kandungan kalsium karbonatnya dapat menurun karena proses pencucian (*leaching*), mengakibatkan pH air tanah bebas (tak tertekan) ikut menurun. Mineral dalam tanah dapat mengabsorbsi ion H^+ dalam air tanah.

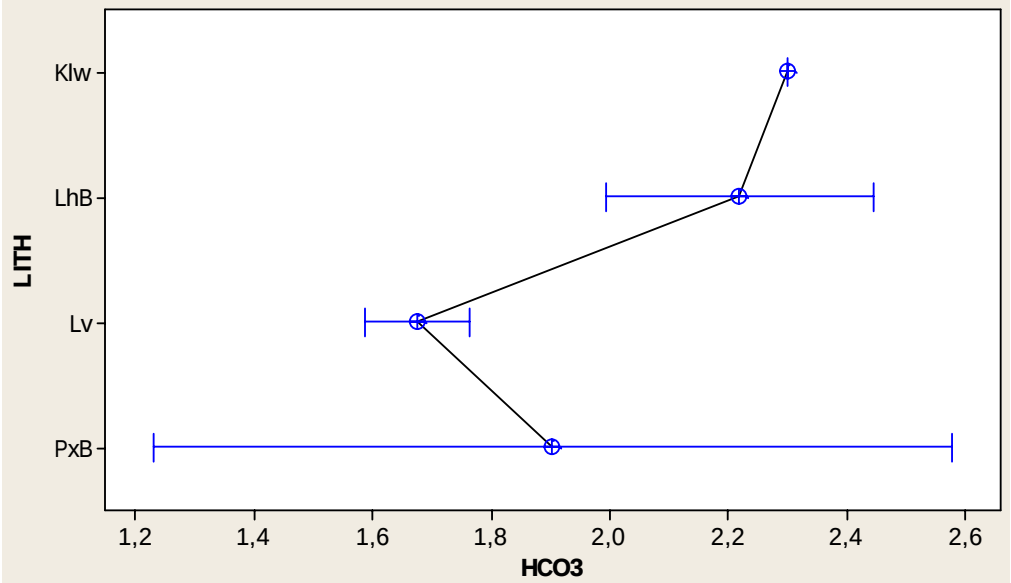
Pada lingkungan mengandung kalsit, sirkulasi air yang mengandung karbondioksida dapat menjadi sangat jenuh senyawa kalsit pada saat kontak dengan udara. Senyawa kalsit tersebut dapat mengendap sebagai travertin pada lokasi pemunculan mata air. Salah satu reaksi yang dapat menghasilkan bikarbonat adalah sebagai berikut:

$$H_2CO_3 + OH^- = HCO_3^- + H_2O$$

Rata-rata bikarbonat dalam contoh air tanah di daerah studi adalah 1,98 meq/L, berkisar antara 0,3 dan 6 meq/L (Gambar 48). Plot interval pada Gambar 49 memperlihatkan rata-rata kandungan bikarbonat pada Formasi Kaliwangu adalah 2,3 meq/L, breksi lahar sebesar 2,2 meq/L, lava sebesar 1,7 meq/L, dan breksi piroklastik sebesar 1,9 meq/L.



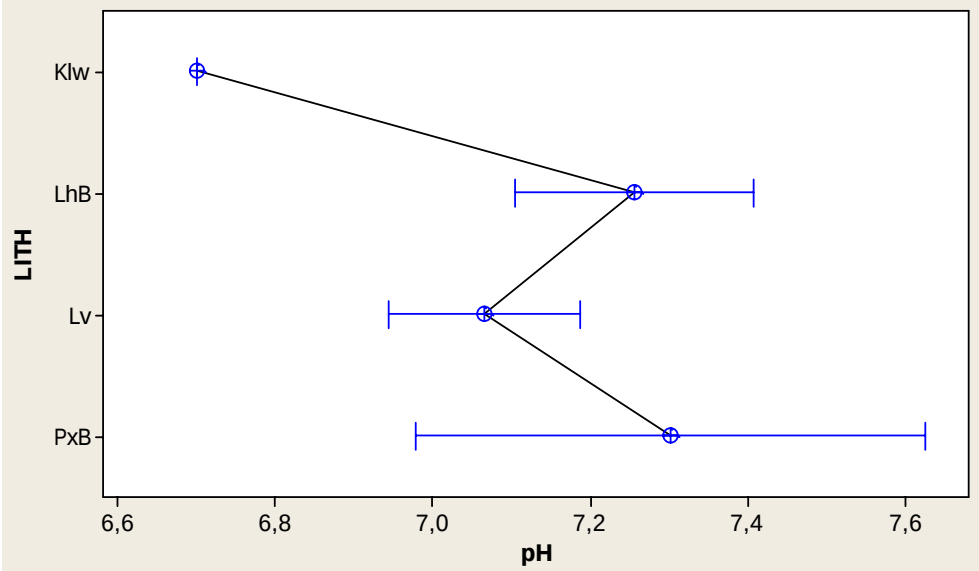
Gambar 48 Histogram komposisi HCO_3^- dalam meq/L



Gambar 49 Plot interval konsentrasi HCO_3^- (meq/L) berdasarkan jenis batuan: breksi lahar (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastik (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

Plot Piper pada Gambar 51 mengilustrasikan 3 fasies air, yaitu Tipe A, B, dan C, berdasarkan konsentrasi ion utama. Berikut ini merupakan deskripsi dari masing-masing fasies:

- Fasies A: ion netral (*no dominant ions*)
- Fasies B: Bikarbonat:
    - Sub fasies B1: kation netral - bikarbonat
    - Sub fasies B2: Kalsium – bikarbonat
    - Sub fasies B3: Magnesium - bikarbonat
- Fasies C: Na-K - klorida



Gambar 50 Plot interval pH berdasarkan jenis batuan: breksi lahars (Lhb), lava (Lv), breksi piroklastiks (PxB), dan Formasi Kaliwangu (Klw).

4.2.8 Fasies Air Tanah

Contoh air tanah umumnya tergolong fasies bikarbonat. Menurut Chebotarev op.cit Freeze dan Cherry (1979), air jenis ini berkorelasi dengan kawasan imbuhan. Fasies ini memiliki suhu normal. Kimia air tanah berevolusi dari fasies ion netral (Fasies A) menjadi 3 sub fasies dengan proses sebagai berikut (diurutkan dari elevasi tinggi ke rendah):

- Menjadi kation netral – bikarbonat (Fasies B1) karena penambahan bikarbonat di kawasan imbuhan.
- Menjadi kalsium – bikarbonat (Fasies B2) karena kontak dengan batuan kaya plagioklas.
- Menjadi magnesium – bikarbonat (Fasies B3) karena kontak dengan batuan gunung api yang bersifat *ferromagnesian*.
- Menjadi natrium – kalium – klorida (Fasies C) karena berinteraksi dengan batuan sedimen.

4.3 Analisis Korelasi

Korelasi adalah ukuran hubungan antara 2 atau lebih variabel/parameter, direfleksikan oleh koefisien korelasi. Nilai koefisien korelasi bergerak dari -1,00 ke +1,00, masing-masing menunjukkan korelasi sempurna negatif dan positif. Nilai koefisien 0,00 menunjukkan tidak ada korelasi sama sekali. Analisis korelasi digunakan untuk mengekstrak parameter penting dan hubungannya dengan parameter lainnya, sebagaimana ditampilkan tabel berikut ini.

Berdasarkan tabel tersebut, kita dapat melihat korelasi yang kuat antara elevasi dan parameter lainnya. Korelasi yang kuat antara TDS dengan ion utama juga diperlihatkan pada tabel. Masing-masing korelasi akan dideskripsikan pada sub bab berikut ini.

4.3.1 Temperatur vs Elevasi

Distribusi elevasi dan temperatur memperlihatkan diferensiasi karakter mata air. Dari gambar berikut ini dapat diketahui gradien temperatur lingkungan Ciremai mengikuti persamaan berikut ini:

$$Elv = 2441 - 67.98\ AT,$$

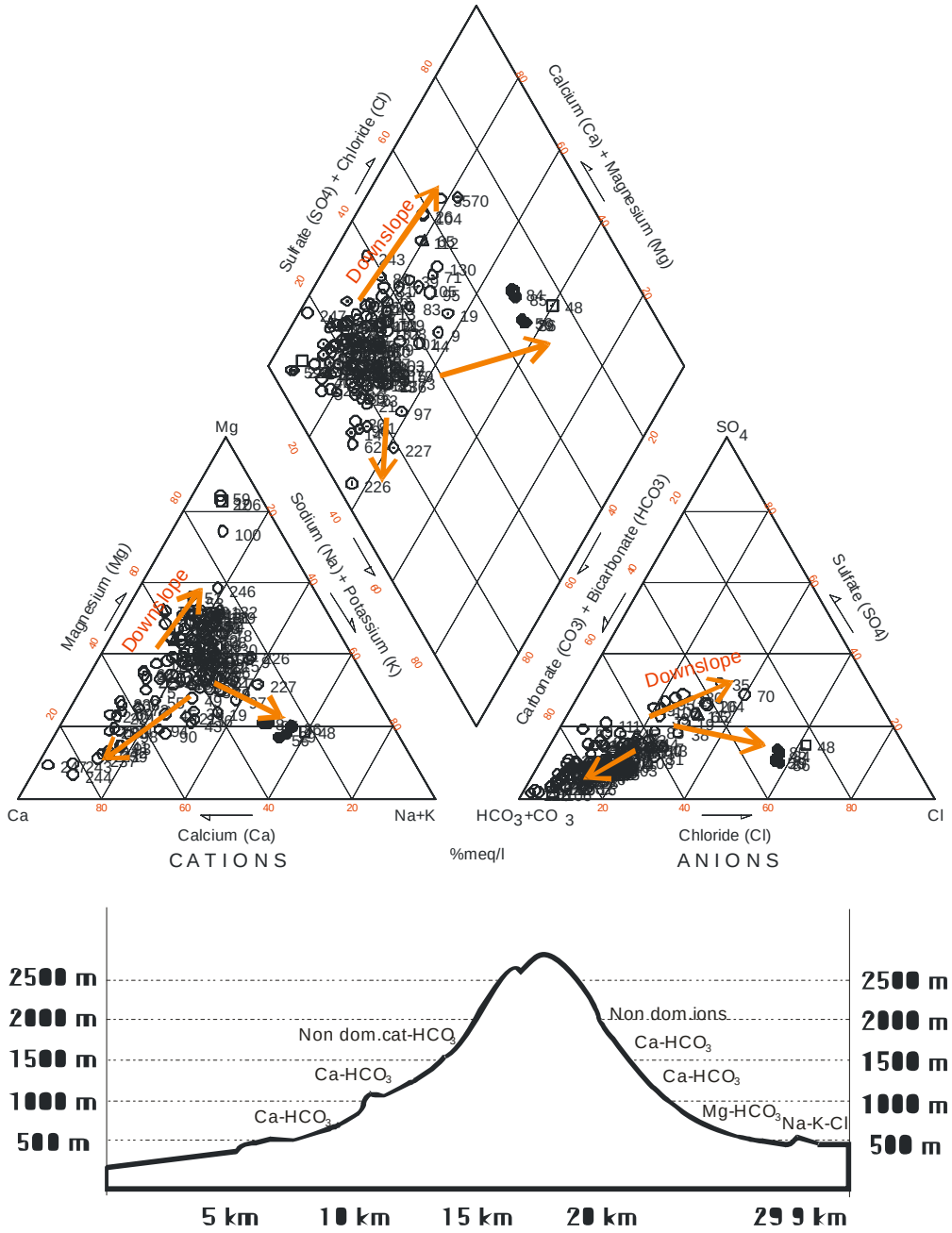
Notasi Elv menunjukkan elevasi dan AT menunjukkan temperatur udara.

Garis ini sangat berguna sebagai referensi untuk mengklasifikasikan mata air berdasarkan karakter termalnya (Gambar 52), menjadi mesotermik, hipotermik, dan hipertermik sebagai berikut:

1) Mesotermik merupakan kelompok mata air yang memiliki suhu air dalam kisaran yang sama dengan suhu udara di permukaan. Air tanah jenis ini telah berhubungan dengan suhu udara di permukaan. Interpretasi lainnya adalah jenis akifernya adalah akifer tak tertekan yang tidak dalam.

2) Hipotermik mengandung mata air dengan temperatur air lebih rendah dibanding temperatur udara. Mata air-mata air ini tidak kontak dengan suhu permukaan. Aliran sistem ini diperkirakan berada pada sistem akifer tertutup, terisolasi dari suhu udara. Hal ini muncul pada akifer breksi lahar, yang tersebar pada elevasi rendah.

Hipertermik beranggotakan mata air dengan suhu air lebih tinggi dibanding suhu udara. Panas yang berlebihan diinterpretasikan dari aktivitas vulkanisme. Panas yang ada diperkirakan telah turun karena bersentuhan dengan air tanah meteorik.

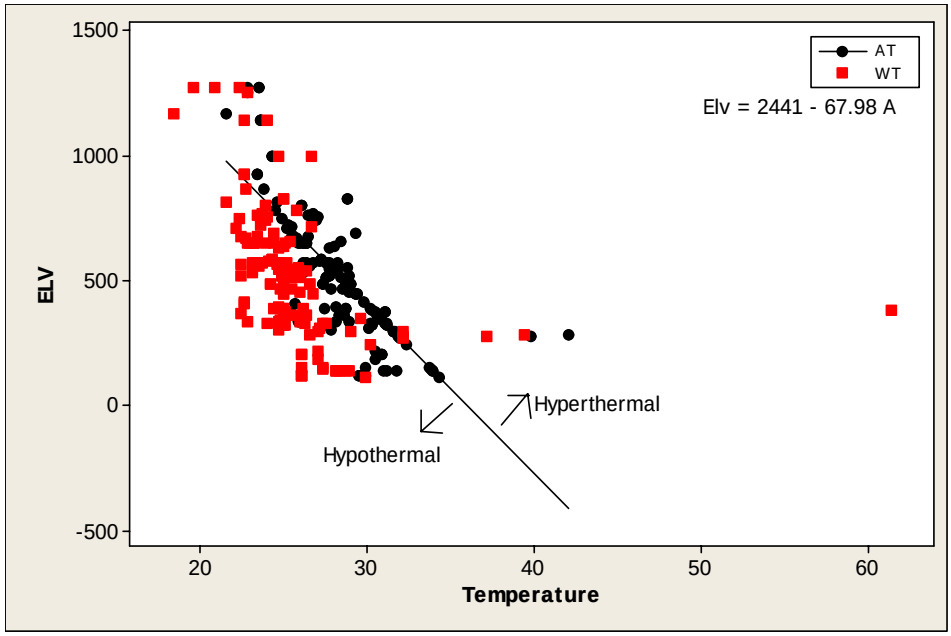


Gambar 51 Plot Piper contoh contoh air tanah dan rekonstruksi proses evolusi kimia airnya

Tabel 4.19 Koefisien korelasi hasil analisis

	ELV	*Q*	*TDS*	*EC*	*pH*	*WT*	*AT*	*Na*	*K*	*Ca*	*Mg*	*Cl*	*HCO3*	*SO4*
ELV	1													
Q	-0,5	1												
TDS	-0,3	-0,3	1											
EC	-0,3	-0,3	1	1										
pH	0,0	0,0	0,1	0,1	1									
WT	-0,4	-0,1	0,5	0,5	0,2	1								
AT	**-0,8**	0,3	0,5	0,5	0,1	**0,6**	1							
Na	-0,2	-0,2	**0,7**	**0,7**	0,2	0,3	0,3	1						
K	-0,2	-0,3	**0,9**	**0,9**	0,0	0,4	0,4	**0,7**	1					
Ca	-0,2	-0,1	0,4	0,4	0,0	0,2	0,2	0,3	0,4	1				
Mg	-0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	1			
Cl	-0,2	-0,3	**0,9**	**0,9**	0,1	0,4	0,4	**0,8**	**0,9**	0,4	0,1	1		
HCO3	-0,3	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,4	0,3	0,5	**0,7**	0,1	1	
SO4	-0,1	-0,2	**0,7**	**0,7**	0,1	0,3	0,3	**0,8**	**0,7**	0,4	0,1	**0,8**	0,1	1

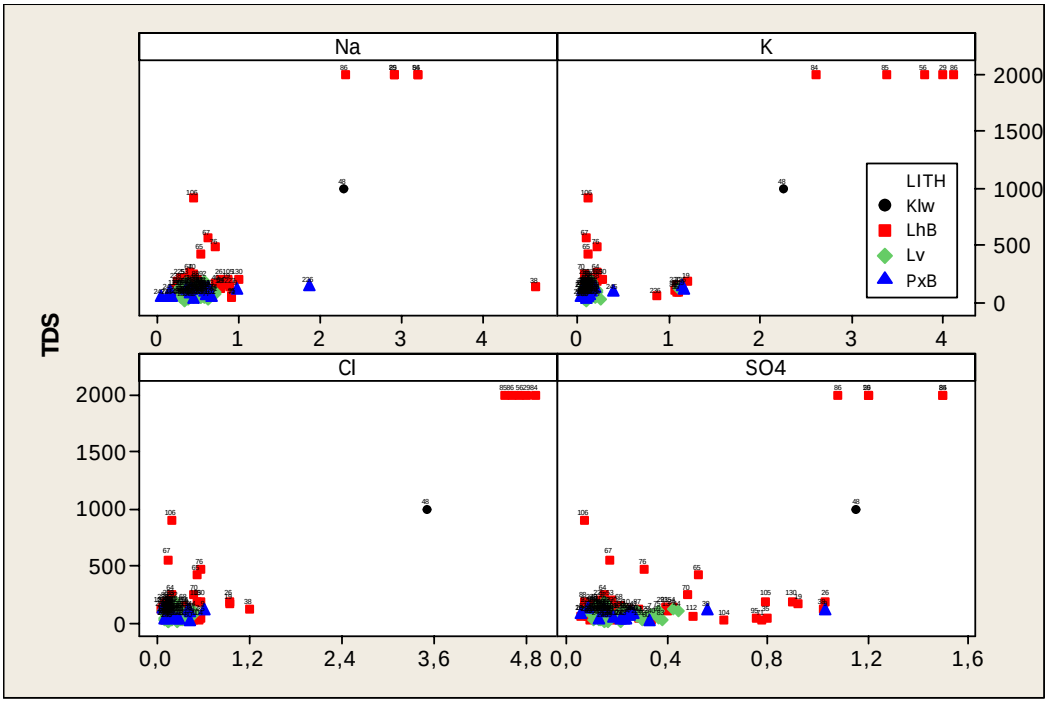
Ket: Elv (elevasi), Q (debit), TDS (*Total Dissolved Solids*), EC (*Electro-Conductivity*), WT (*Water temperature*), AT (*Air temperature*)



Gambar 52 Plot antara elevasi (ELV) dengan temperatur udara (AT) diandai titik hitam, dan temperatur air (WT) ditandai titik merah.

4.3.2 Total Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solids*/TDS) dengan Elemen Utama (Na, K, Cl, SO_4)

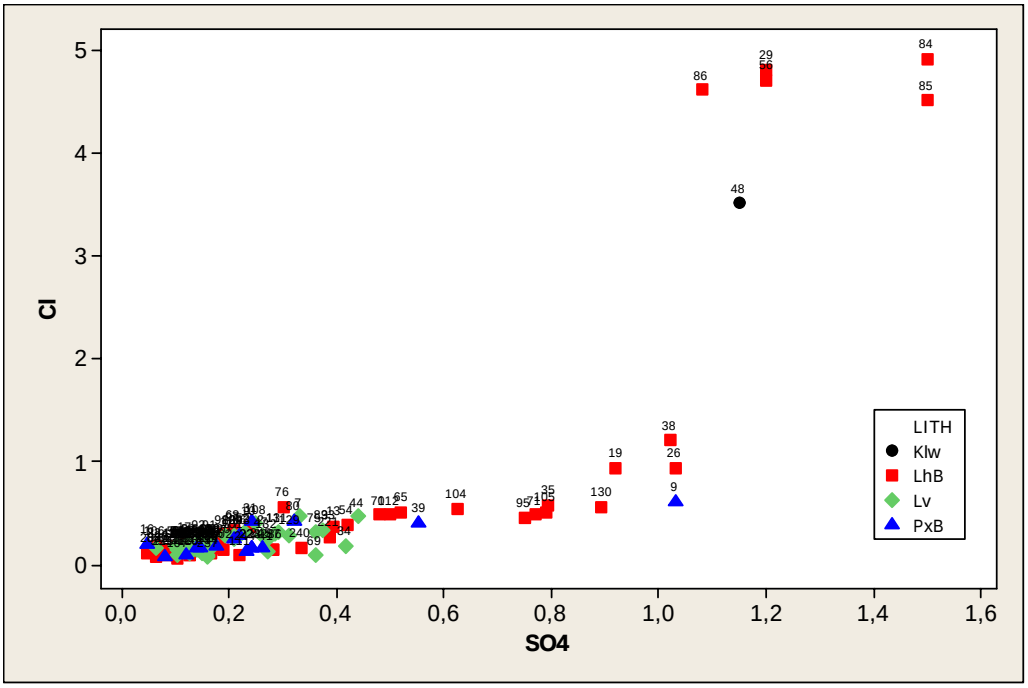
Total Padatan Terlarut (TDS) memiliki korelasi kuat dengan natrium, kalium, klorida, dan sulfat. Korelasi TDS - Cl lebih kuat dibanding TDS – SO_4. Gambar berikut ini memperlihatkan pengelompokkan air tanah berdasarkan relasi antara TDS dengan ion utama (Gambar53). Menurut gambar tersebut, dapat dilihat adanya pola pengelompokkan yang mirip dengan korelasi positif. Plot air hipertermal terpisah dari air mesotermal (normal). Tingginya kadar natrium diduga berasal dari endapan garam halid (NaCl) dari sedimen laut, begitu juga kalium klorida (KCl) dari sumber yang sama. Konsentrasi sulfat yang tidak terlalu tinggi diperkirakan dari endapan natrium sulfat (Na_2SO4) yang berasal dari sedimen laut.



Gambar53 Plot TDS dan Na, K, Cl, SO_4

4.3.3 Klorida (Cl) dengan Sulfat (SO_4)

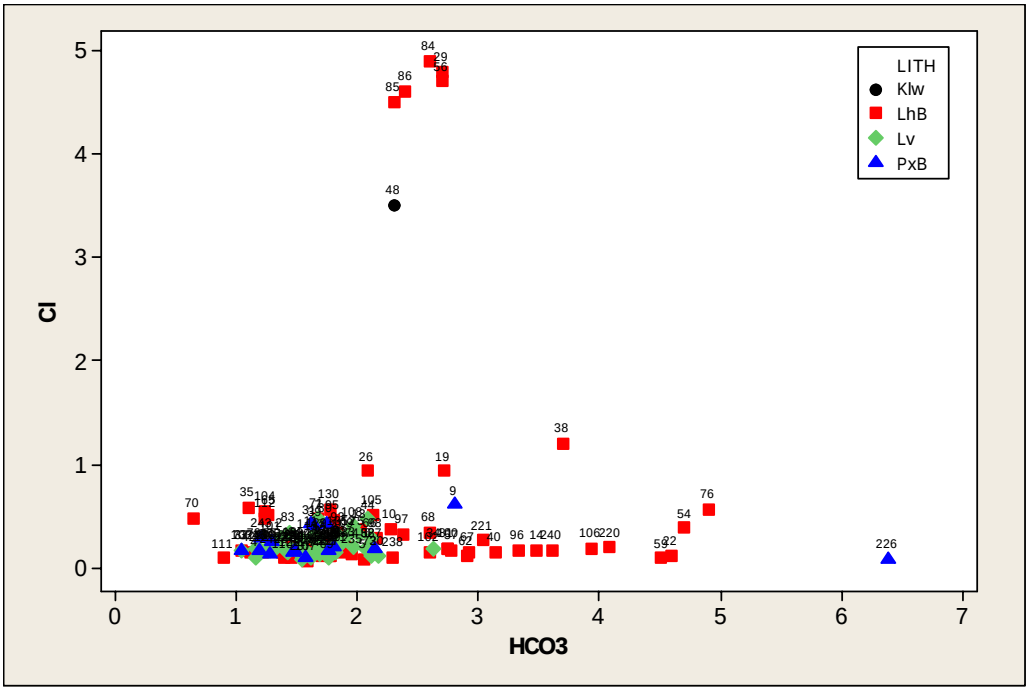
Ion klorida dan sulfat juga memiliki kemiripan hasil plot (Gambar 54) seperti grafik korelasi diatas. Grafik tersebut memperlihatkan pemisahan antara mata air mesotermal dan hipertermal dengan korelasi bersifat positif. Namun demikian, konsentrasi kedua ion meningkat pada ketinggian yang semakin rendah.



Gambar 54 Plot antara ion Cl dan SO_4

4.3.4 Klorida (Cl) dengan Bikarbonat (HCO_3)

Plot antara ion klorida dan bikarbonat memperlihatkan separasi antara kelompok air tanah yang dominan karakter meteorik dengan air tanah yang dominan karakter air formasi (Gambar 55). Karakter air tanah meteorik yang dominan bikarbonat identik dengan karakter air tanah mesotermal, sedangkan karakter air formasi memiliki kemiripan dengan air hipertermal yang mengandung klorida dominan. Konsentrasi kedua ion meningkat sejalan dengan elevasi yang semakin rendah.

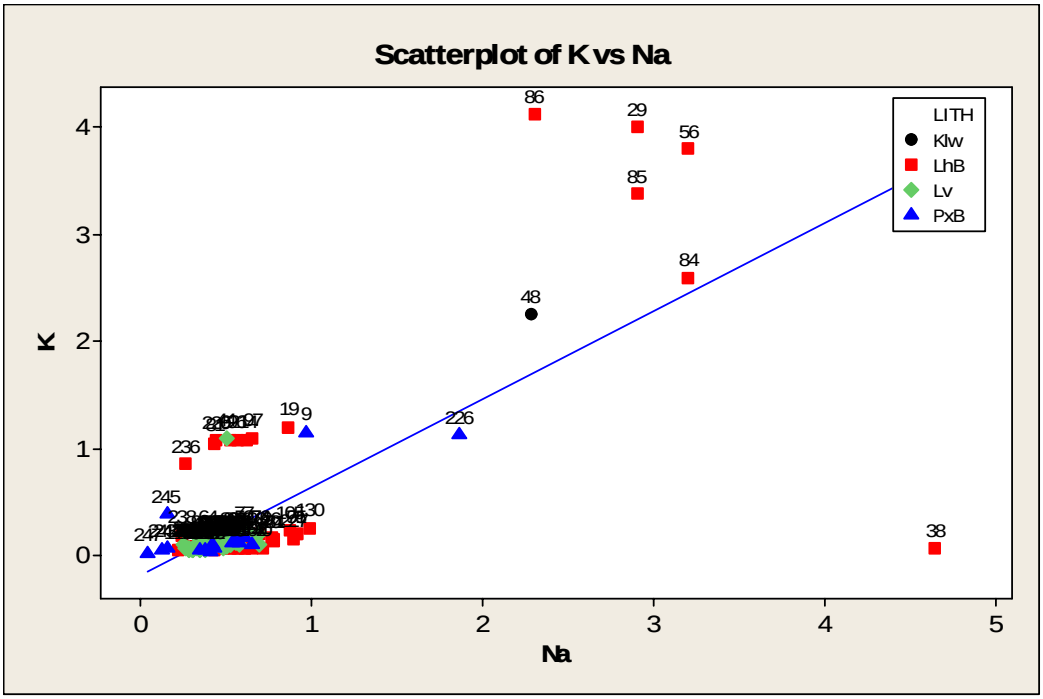


Gambar 55 Plot antara konsentrasi ion Cl dan HCO_3

4.3.5 Kalium (K) dengan Natrium (Na)

Pemisahan juga diperlihatkan pada plot data K dan Na pada mata air antara mata air mesotermal dan hipertermal. Dalam grafik, terlihat ada perubahan konsentrasi K dan Na pada data sejalan dengan perubahan suhu air dan elevasi. Semakin rendah elevasi mata air, maka semakin besar konsentrasi K dan Na.

Terdapat perbedaan rasio Na/K bila contoh dikelompokkan berdasarkan batuan penyusun akifernya. Rasio untuk mata air hipertermal yang dipengaruhi akifer endapan gunung api mendekati 45 kali, sedangkan untuk contoh yang dipengaruhi batuan sedimen berkisar antara 0,6-0,8.



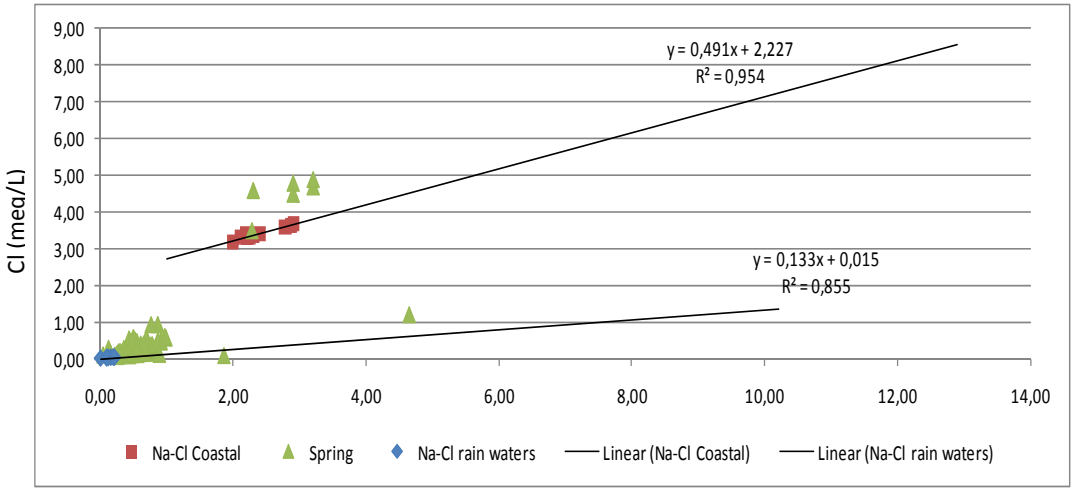
Gambar 56 Plot antara konsentrasi K dan Na

4.3.6 Klorida (Cl) dengan Natrium (Na)

Differensiasi pada mata air juga terlihat pada korelasi ion Na dan Cl yang menunjukkan komunalitas antara mata air pada akifer relatif dangkal dengan akifer yang lebih dalam. Dalam grafik, data dari Ciremai mencakup mata air mesotermal dan hipertermal (warna hijau) diplot bersama dengan data pembanding berasal air hujan (warna biru) dan dari sumur di kawasan pantai Indramayu, Semarang, dan Rembang (warna merah).

Pada grafik di bawah ini dapat dilihat bahwa terjadi pemisahan antara data dari Ciremai mencakup mata air dan air hujan dengan data dari daerah pantai. Contoh air dari daerah pantai lebih kaya akan Na dan Cl dibanding contoh dari daerah gunung api. Namun demikian terdapat contoh air dari gunung api yang berkelompok dengan contoh dari daerah pantai. Contoh ini adalah mata air hipertermal dari akifer yang lebih dalam atau setidaknya pernah berinteraksi dengan sedimen yang lebih dalam.

Publikasi oleh Join et.al (1997) menerangkan bahwa di zona permukaan (*superficial zone*) di kawasan imbuhan, akifer berasosiasi dengan air yang mengandung klorida alamiah dari atmosfer. Selama proses perkolasi menuju zona yang lebih bawah, konsentrasi natrium dan klorida bertambah secara progresif dengan pelaturan natrium dari batuan gunung api. Kandungan klorida juga akan meningkat sejalan interaksi air tanah dengan akifer yang lebih dalam, sesuai dengan teori dari Chebotarev. Air hipertermal yang telah bersirkulasi pada akifer dalam dengan suhu tinggi yang mengkatalis reaksi dengan akifer, akan memiliki karakter yang mirip dengan air tanah dari daerah pantai, yaitu mengandung klorida tinggi.



Gambar 57 Scatter plot between Na dan Cl

Pada grafik di atas, merujuk pada contoh analisis oleh Join et.al (1997) didapatkan garis air hujan (*rain water line*) dan garis air asin/pantai (coastal/saline water line) dengan persamaan sebagai berikut:

$$Cl =. 0.133\ Na + 0.015\ ;\ r^2 = 0.86\ (rain\ water\ line)$$

$$Cl =. 0.491\ Na + 2.227;\ r^2 = 0.95\ (coastal/saline\ water\ line)$$

4.4 Analisis Multivariabel

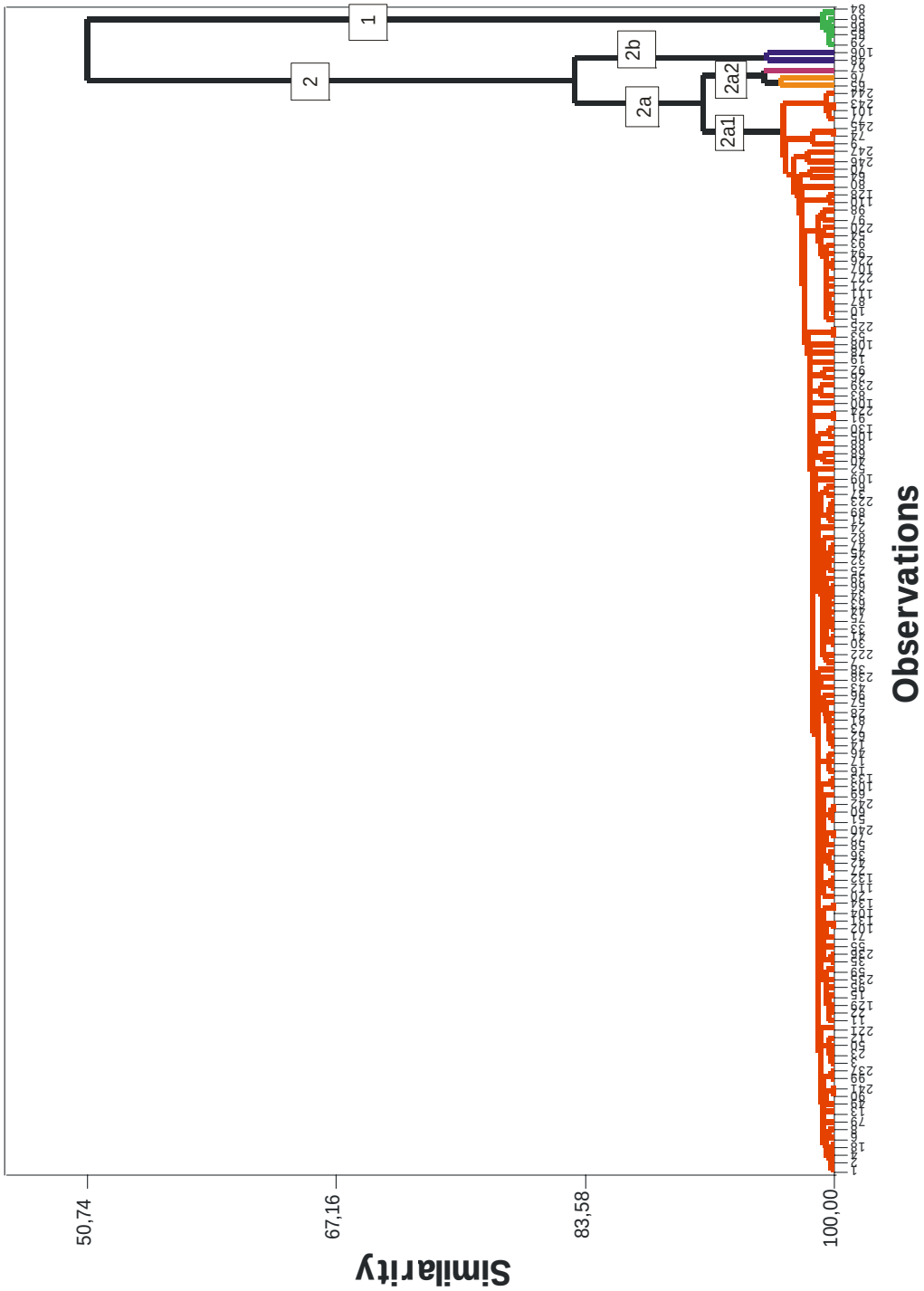
4.4.1 Analisis Klaster (AK)

Hasil dari AK adalah dendogram (diagram cabang/pohon) 140 contoh air tanah pada

Gambar58. Untuk riset ini jarak *Euclidean* atau *Euclidean distance* dipilih sebagai teknik pengukuran jarak antar klaster dan kemiripannya. Kemudian klaster yang berhasil diidentifikasi digabungkan oleh aturan penggabungan (*linkage rule*) secara iteratif hingga seluruh kasus observasi dapat diklasifikasikan. Hasil analisis menggunakan piranti lunak Minitab 15 (*trial version*) menjumpai 2 klaster dinotasikan sebagai C1 dan C2. Masing-masing klaster dibagi-bagi lagi menjadi sub klaster sebagai berikut:

Total contoh air tanah	140 mata air	
→ Klaster 1 (C1):	5 mata air	(4%)
→ Klaster 2 (C2):	135 mata air	(96%)
→ Klaster 2a (C2a)		
→ Klaster 2a1 (C2a1)	130 mata airs	(93%)
→ Klaster 2a2 (C2a1)	3 mata airs	(2%)
→ Klaster 2b (C2b)	2 mata airs	(1%)

Pemisahan antara C1 dan C2 mengindikasikan bahwa contoh air tersebut berbeda dari sifat hidrokimianya. Bila dicocokkan dengan analisis kimia pada Diagram Piper, C1 adalah mata air yang dominan karakter batuan sedimen, sementara C2 dominan endapan gunung api. C1 dicirikan oleh kandungan klorida dan nilai TDS yang tinggi, sementara while C2 memiliki kandungan bikarbonat dominan. Lebih rinci lagi, C2 dibagi menjadi C2a dan C2b, berdasarkan composition kation utamanya. C2a diperkaya oleh Ca dan Mg, dinotasikan C2a1 dan C2a2 secara berurutan. Kemudian C2b diperkaya oleh Na dengan peningkatan konsentrasi klorida.



Gambar58 Dendogram of Analisis klaster (Minitab trial version)

4.4.2 Analisis Komponen Prinsipal (AKP)

AKP berhasil mengekstrak 3 *Principal Component* (PC) atau Komponen Prinsipal (KP). Berikut ini adalah bahasan mengenai komponen tersebut berdasarkan plot pada Gambar 59. PC1 mengakomodasi 39% variansi pada data, terdiri dari variabel TDS, EC, natrium, kalium, klorida, sulfat. PC2 mengakomodasi 16.5% variansi, terdiri dari variabel elevasi, temperatur udara, dan debit mata air. PC3 mengakomodasi 15% variansi, terdiri dari variabel bikarbonat dan magnesium (Tabel 20).

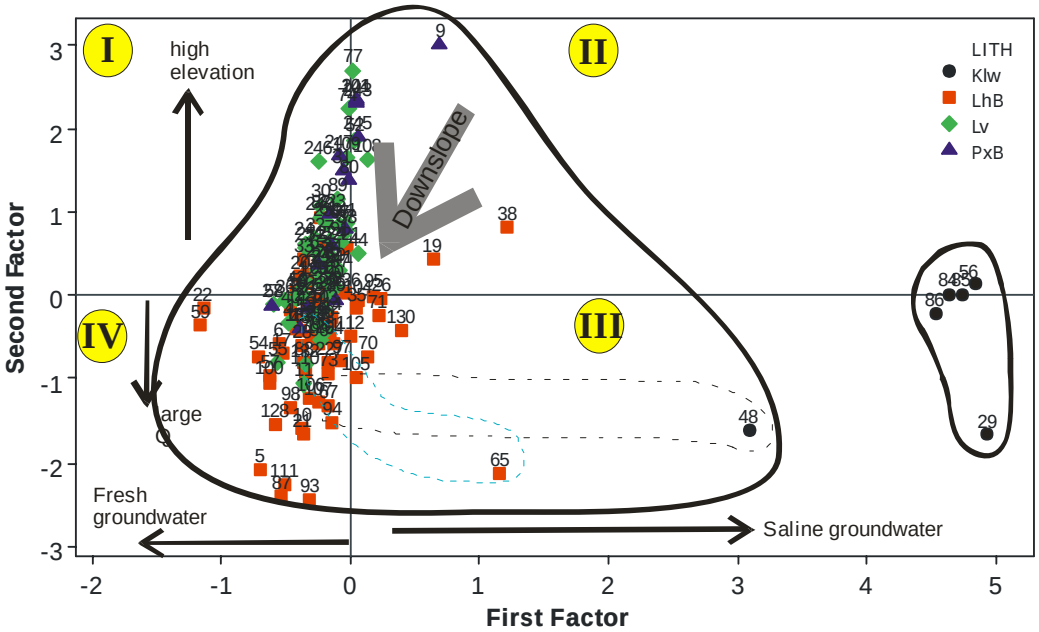
Gambar 59 memperlihatkan separasi contoh air tanah berbasis kuadran/quadrant (Q). Kuadran I didominasi air tanah yang muncul pada elevasi tinggi yang bersirkulasi pada batuan breksi piroklastik dan lava. Kuadran II tidak memiliki variabel domination. Kuadran III diisi oleh contoh air tanah asin dengan temperatur tinggi atau air hipertermal. Kuadran ini dikendalikan oleh variabel TDS, EC, Na, K, Cl, dan SO_4. Kuadran IV berisi mata air dengan debit besar pada elevasi lebih rendah. Air tanah dalam kuadran ini bersirkulasi dalam akifer breksi lahar.

Kuadran I dan II merepresentasikan kawasan imbuhan. Kemudian air tanah mengalir ke elevasi lebih rendah, dicerminkan oleh Kuadran III dan IV. Air tanah tanah meteorik pada endapan gunung api berada lebih dekat ke Kuadran IV, sementara air tanah hipertermal lebih dekat ke Kuadran III.

Tabel 20 Factor loading from PCA

Rotated Factor Loadings dan Communalities
Varimax Rotation

Variable	Factor1	Factor2	Factor3	Communality
ELV	-0,095	**0,894**	-0,189	0,843
Q	-0,440	**-0,622**	0,051	0,583
TDS	**0,927**	-0,180	0,154	0,916
EC	**0,927**	-0,180	0,154	0,916
pH	0,102	-0,044	0,132	0,030
WT	0,461	-0,555	-0,005	0,520
AT	0,350	**-0,837**	0,168	0,851
Na	**0,801**	-0,065	0,230	0,699
K	**0,901**	-0,086	0,166	0,846
Ca	0,418	0,004	0,530	0,455
Mg	0,007	-0,157	**0,832**	0,717
Cl	**0,974**	-0,091	0,091	0,964
HCO3	0,080	-0,087	**0,947**	0,911
SO4	**0,818**	-0,017	0,119	0,684
Variance	5,5197	2,3120	2,1048	9,9365
% Var	0,394	0,165	0,150	0,710



Gambar 59 Plot komponen prinsipal antara PC 1 dan PC2

4.5 Catatan

4.5.1 Aplikasi Analisis Klaster dan Analisis Komponen Prinsipal

Riset ini memperlihatkan bahwa analisis multivariabel dapat membantu untuk mengklasifikasikan mata air berdasarkan sifat fisik dan kimia air tanah. Metoda tersebut dapat digunakan untuk menganalisis dan mencari struktur korelasi pada data yang banyak secara simultan.

Analisis Klaster telah mengklasifikasikan mata air ke dalam 4 klaster berikut ini. Klaster 1 terdiri dari 5 (4%) mata air hipertermal dengan TDS dan klorida yang tinggi, bikarbonat menengah, dan sulfat rendah. Klaster 2 memiliki 2 sub klaster. Klaster 2a beranggotakan 133 mata air. Sebanyak 130 (93%) mata air mesotermal dan 3 (2%) mata air. Klaster ini berisi air tanah hipertermal yang telah mengalami pengenceran/pencampuran dengan air meteorik sehingga memiliki TDS menengah, klorida rendah, bikarbonat tinggi, dan sulfat rendah. Klaster 2b terdiri dari 2 (1%) mata air juga merupakan air tanah hipertermal yang telah berinteraksi dengan air tanah normal, sehingga memiliki TDS tinggi, klorida rendah, bikarbonat menengah, dan sulfat rendah.

Hasil dari AKP menunjukkan separasi contoh air tanah yang mendukung dengan hasil diatas. Berdasarkan hasil analisisnya terdapat air tanah yang dikendalikan oleh elevasi pada Kuadran I dan debit yang tinggi pada Kuadran IV. Kedua kuadran tersebut berisi contoh air tanah mesotermal dengan TDS dan ion utama normal. Sebaliknya pada Kuadran III terdapat contoh air asin (*saline water*) hipertermal. Kuadran ini dikendalikan oleh TDS, EC, dan ion utama, khususnya klorida. Berikut ini merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi komposisi kimia air tanah:

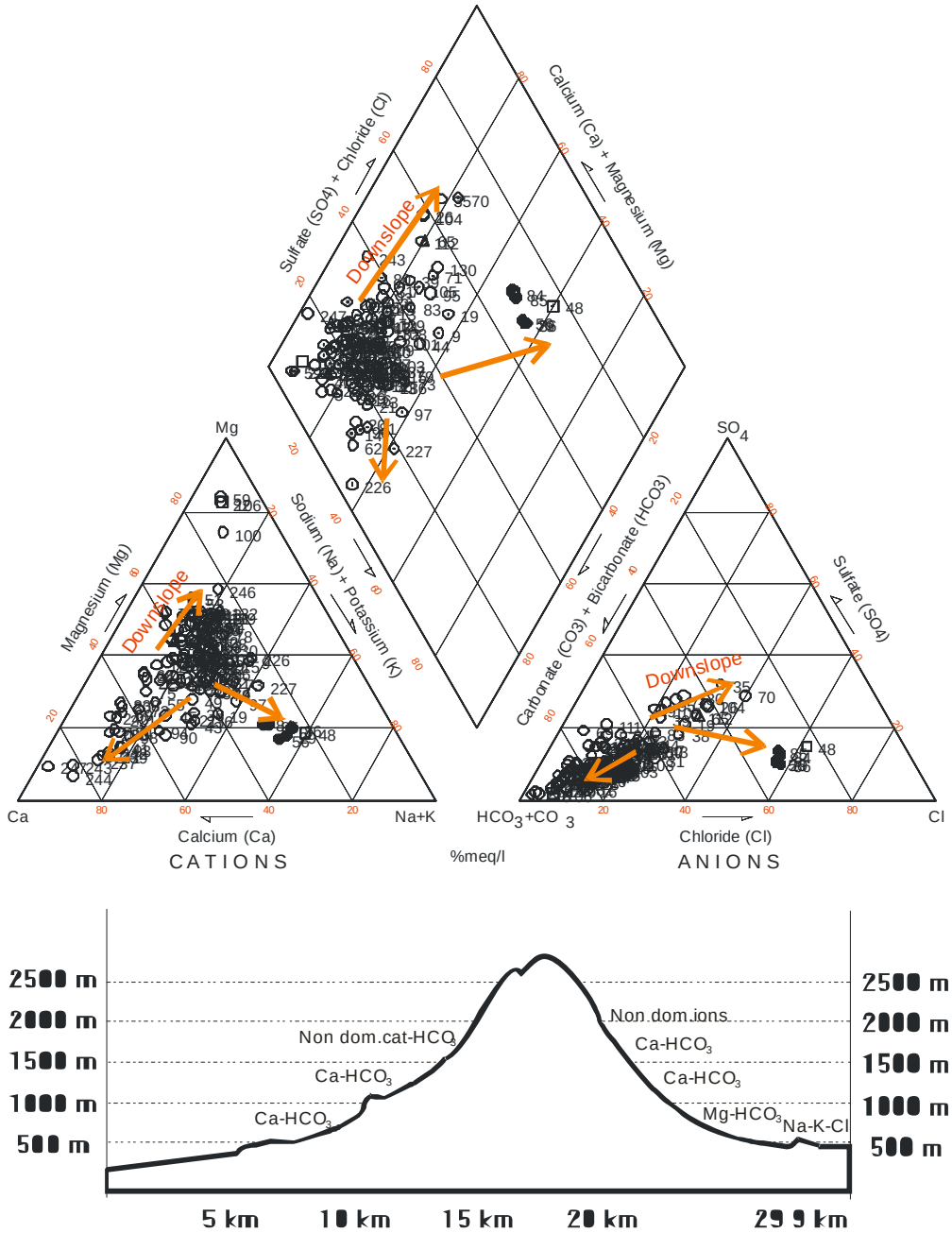
- Komposisi endapan gunung api
- Konduktivitas hidrolik endpan gunung api yang tinggi karena adanya media rekaha.
- Sumber panas dari proses volcanisme dan gradien geothermal.

4.5.2 Evolusi Air tanah

Evolusi air tanah berawal dari fasies ion netral (Fasies A) sebagai jenis air yang sama dengan fasies air hujan. Kemudian air terdiferensiasi menjadi 3 fasies dari elevasi tinggi ke rendah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 60. Variasi lain dari fasiesn ini adalah kation netran bikarbonat (Fasies B1). Fasies berikutnya adalah kalsium bikarbonat (Fasies B2) hasil kontak dengan batuan yang kaya plagioklas. Air kemudian berubah menjadi fasies magnesium bikarbonat (Tipe B3). Air ini diperkaya oleh batuan ferromagnesian. Selanjutnya air mengalir ke akifer yang lebih dalam serta berinteraksi dengan batuan sedimen menjadikan fasiesnya berubah menjadi natrium-kalium-klorida (Fasies C).

Masing-masing fasies mencerminkan *Hydrogeological System* (HS) atau sistem hidrogeologi tertentu. HS1 berkaitan dengan air Fasies A dan B. Air tanah pada sistem ini masih didominasi oleh air meteorik atau disebut pula air muda atau disebut *immature water* dalam triangular plot oleh Herdianita dan Priadi (2008).

HS2 dan HS3 terkait dengan Fasies C. Kedua sistem tersebut tergolong air tua (*mature waters*). HS2 diperkirakan merupakan interaksi antara sistem air tanah mesotermal dan hipertermal. Sementara HS3 mengalir pada akifer yang lebih dalam dibandingkan HS2. Sistem ini merupakan air tanah hipertermal yang berkorelasi dengan sedimen laut, berupa Formasi Kaliwangu dan Halang. Lapisan-lapisan yang berada di bawah endapan gunung api Ciremai inilah yang memberikan konsentrasi klorida.



Gambar 60 Kombinasi fasies air tanah dengan analisis multi variabel dalam proses evolusi air tanah

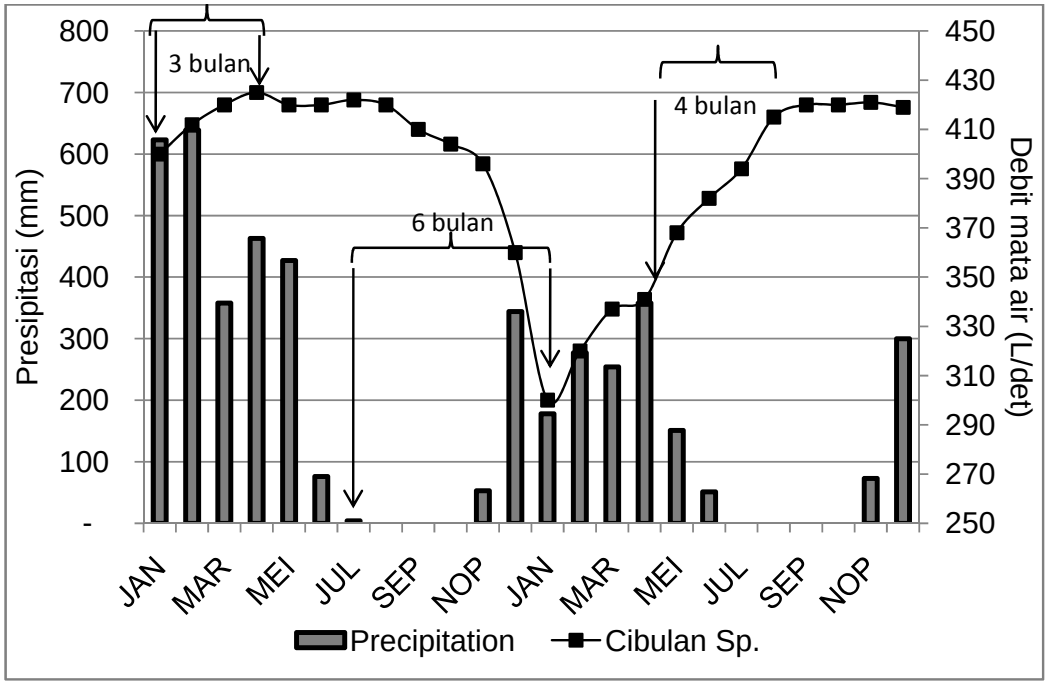
BAB 5 ANALISIS HIDROGRAF MATA AIR

Data berurut waktu (*time series*) diambil dari beberapa mata air, yakni Cibulan, Telaga Remis, dan Ciuyah springs. Ketiganya dipilih karena mencerminkan 3 sistem hidrogeologi yang berbeda seperti telah dijelaskan pada bab 4. Cibulan dan Telaga Remis tergolong Sistem Hidrogeologi 1, sementara Ciuyah termasuk Sistem Hidrogeologi 3. Pengukuran yang dilakukan meliputi jumlah curah hujan/presipitasi yang terdekat dari mata air, debit mata air, nilai TDS, dan EC. Tahapan ini dimulai Januari 2006 hingga Desember 2007.

5.2 Mata Air Cibulan

5.2.1 Hidrograf Debit Mata Air dengan Curah Hujan

Curah hujan diukur pada stasiun Susukan pada elevasi 309 mdpl. Dari **Error! Reference source not found.** menayangkan fluktuasi debit mata air dan curah hujan. Beda waktu antara puncak kedua data tersebut berkisar antara 3 hingga 4 bulan mulai awal musim hujan. Kemudian debit mata air mulai menurun dalam waktu 3 bulan sejak dimulainya musim kemarau. Mencermati kondisi tersebut, maka dapat disebutkan bahwa debit mata air dipengaruhi oleh curah hujan. Respon yang lambat disebabkan waktu perjalanan (*travel time*) yang lama dari kawasan imbuhan hingga muncul di lokasi mata air. Waktu resesi yang pendek mencerminkan pengurasan dari simpanan (*storage*) akifer yang cepat. Akifer diduga merupakan kombinasi antara media rekahan dan media pori.

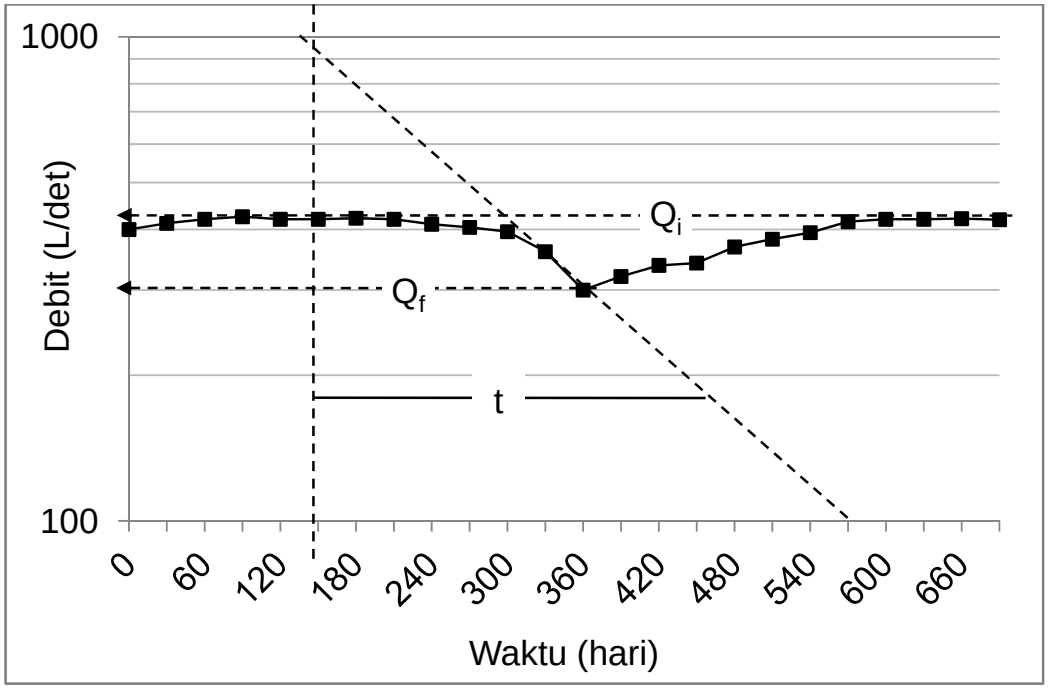


Gambar 61 Plot berurut waktu antara debit mata air (sumbu y kanan) dan presipitasi (sumbu y kiri) di lokasi Mata Air Cibulan

Analisis hidrograf Cibulan untuk mengetahui luas kawasan imbuhan sesuai contoh oleh Pacheo dan Alencoao (2005) dengan persamaan sebagai berikut dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada **Error! Reference source not found.**.

$$R = (Q_i - Q_f)\frac{t}{2{,}3} \qquad\qquad R = (Q_i - Q_f)\frac{t}{2{,}3}$$

Dari **Error! Reference source not found.** didapatkan t = 420 hari, Q_i = 425 L/det dan Q_f = 300 L/det, sehingga (Q_i - Q_f) adalah 125 L/det. Dengan demikian didapatkan R sebesar kurang lebih 8.283.130.435 m^3. Hasil perhitungan R tersebut bila dibagi dengan curah hujan (CH) dengan memilih CH rata-rata selama 2 tahun (2006 dan 2007), maka didapatkan luas daerah imbuhan sebesar kurang lebih 3.725 km^2.



Gambar 62 Plot semilog analisis hidrograf debit Mata Air Cibulan

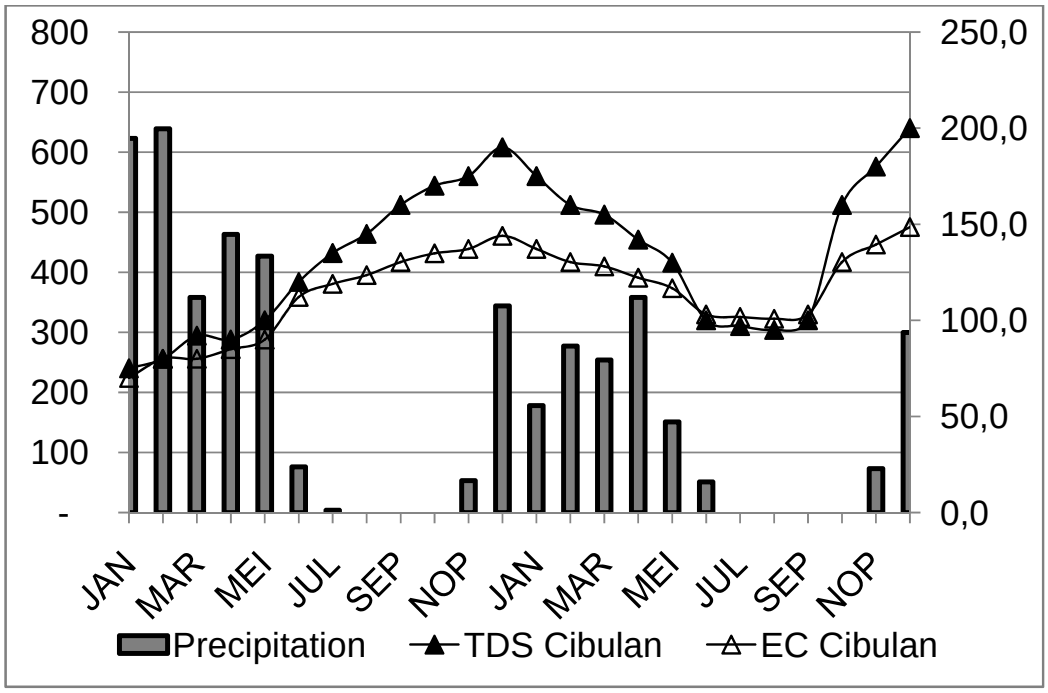
5.2.2 Fluktuasi TDS, EC, dan Temperatur

Nilai TDS bertambah 3 kali pada bulan-bulan dengan curah hujan rendah. Kondisi yang mirip juga ditunjukkan oleh EC, yang memperlihatkan peningkatan nilai EC 2,5 kali (**Error! Reference source not found.**). Perilaku fluktuasi kedua parameter tersebut sama dengan rincian sebagai berikut:

- Fasa Pengenceran : Desember 2006 - Juni 2007
- Fasa Pemulihan : Juli - September 2007
- Fasa Pelarutan : Oktober - December 2007, hingga ke tahun 2008.

Kedua parameter meningkat dalam waktu 11 bulan setelah titik curah hujan terendah. Kemudian menurun dalam waktu 7 bulan setelah titik curah hujan tertinggi. Dengan demikian fasa pengenceran lebih cepat dibanding fasa pelarutan. Dari kondisi tersebut dapat diinterpretasikan bahwa imbuhan air hujan berlangsung lebih cepat dibanding lama waktu kontak air tanah di dalam akifer. Respon yang tidak instan tersebut mengindikasikan terdapat kombinasi antara

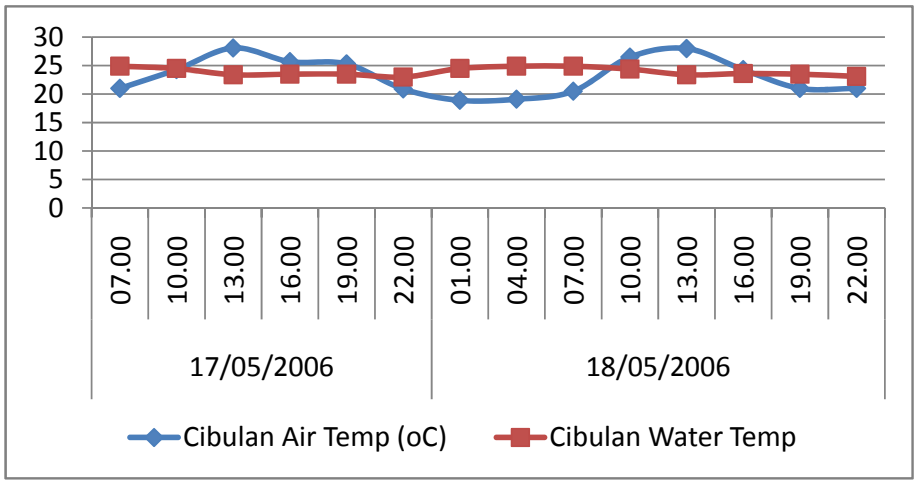
media pori dan rekahan pada sistem akifer, sesuai dengan pendapat Singhal dan Gupta (2005).



Gambar 63 Plot berurut waktu TDS dan EC (sumbu y kanan); dan presipitasi (sumbu y kiri) di lokasi Mata Air Cibulan

Observasi temperatur air dan udara selama 24 jam telah dilakukan pada tanggal 17 – 18 Mei 2006. Hasilnya ditampilkan pada

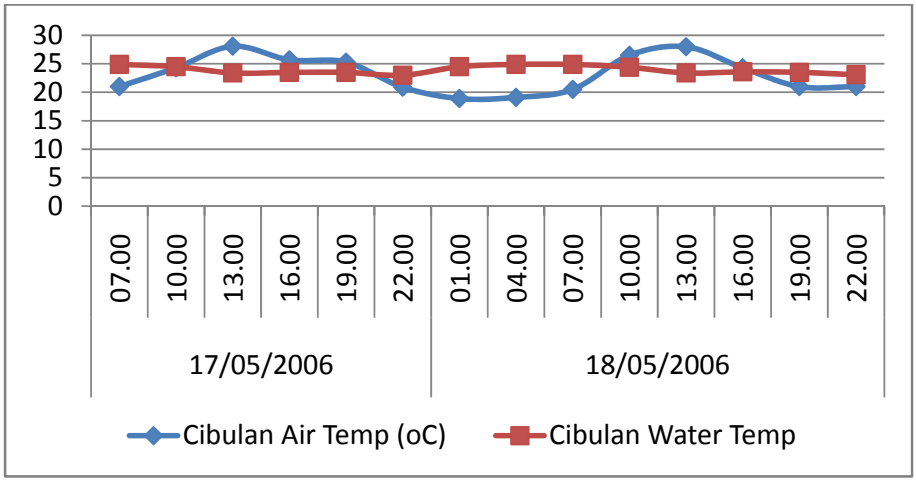
dan diplot pada



. Air memiliki suhu rata-rata 23,9^{o}C, dengan maksimum 24,9^{o}C dan minimum 23,0^{o}C. Sementara udara memiliki suhu rata-rata 23,2^{o}C, maksimum 28,1^{o}C dan minimum 18,9^{o}C. Pada waktu-waktu tertentu terjadi perbedaan suhu. Suhu air tanah lebih rendah dibanding suhu udara pada pkl 13.00 dan 10.00-16.00. Sebaliknya suhu air tanah lebih tinggi dibanding suhu udara pada pkl. 07.00, 22.00-07.00, dan 19.00-22.00.

Tabel 21 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Cibulan

	Date	17/05/2006								18/05/2006					
Spring	Temp/Time	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00
	Air temp (^{o}C)	21	24,3	28,1	25,7	25,3	20,9	18,9	19,1	20,5	26,5	28	24,3	21	21
Cibulan	Water temp (^{o}C)	24,9	24,5	23,4	23,5	23,5	23	24,5	24,9	24,9	24,4	23,4	23,6	23,5	23,1
	|Del T|	3,9	0,2	4,7	2,2	1,8	2,1	5,6	5,8	4,4	2,1	4,6	0,7	2,5	2,1



Gambar 64 Plot hasil pengukuran suhu air dan udara di lokasi Mata Air Cibulan selama 24 jam

5.3 Mata air Telaga Remis

5.3.1 Hidrograf Debit Mata Air dengan Curah Hujan

Mata air Telaga Remis dianalisis dengan menggunakan data stasiun hujan Mandirancan pada elevasi 293 mdpl. Analisis antara debit mata air dan curah hujan tersebut disampaikan pada **Error! Reference source not found.**.

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa beda waktu (*time lagi*) antara puncak curah hujan dengan puncak debit mata air adalah 3-5 bulan. Kemudian debit mata air berkurang disebabkan musim kemarau dengan beda waktu 4 bulan sejak awal musim tersebut. Debit paling rendah dicapai pada waktu 7 bulan sejak musim kemarau.

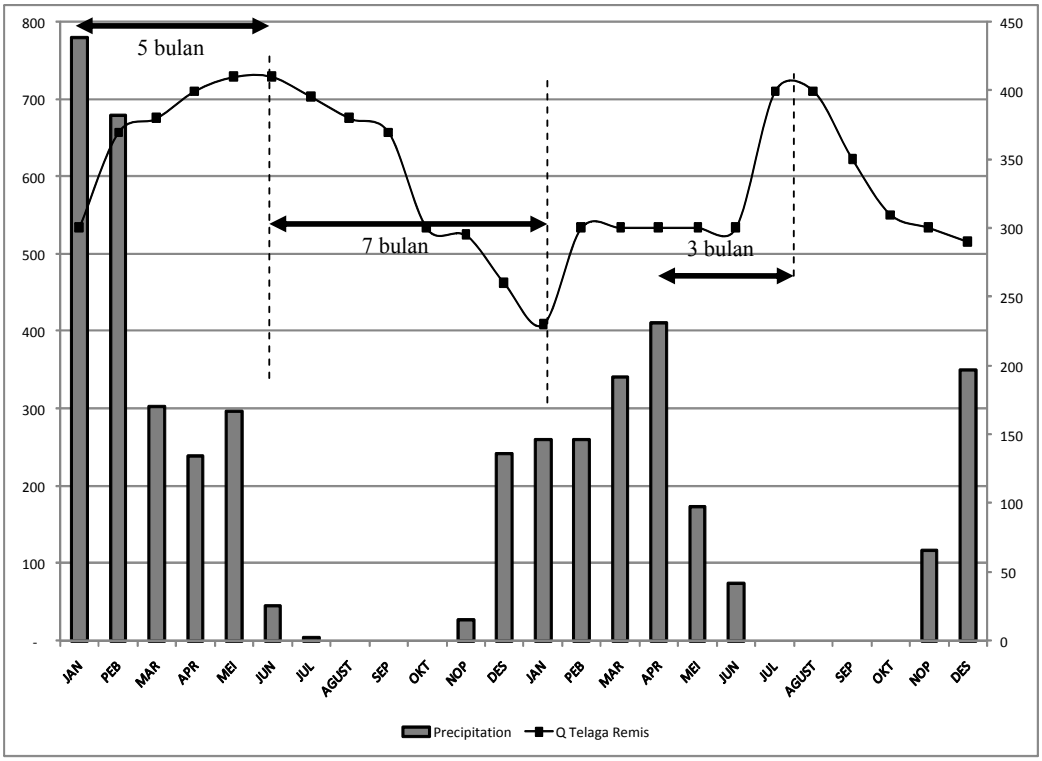
Respon yang lambat disebabkan waktu aliran air tanah yang lama dari kawasan imbuhan ke kawasan pengurasan. Kedua parameter diatas memperlihatkan relasi yang cukup dekat, melihat siklus debit yang mendekati siklus curah hujan. Adanya bentuk-bentuk kemiringan lereng yang berbeda, ada yang landai dan terjal, mengindikasikan perbedaan sistem akifer. Lereng yang landai diperkirakan karena mendapat sumbangan imbuhan dari akifer media pori tanah pelapukan. Sementara lereng yang terjal dapat terjadi karena air tanah mengalir pada akifer media rekahan.

Dari **Error! Reference source not found.** didapatkan t = 525 hari, Q_i = 400 L/det dan Q_f = 225 L/det, sehingga (Q_i - Q_f) adalah 125 L/det. Dengan demikian didapatkan R sebesar kurang lebih 14.495.478.261 m^3. Hasil perhitungan R tersebut bila dibagi dengan curah hujan rata-rata selama 2 tahun (2006 dan 2007), maka didapatkan luas daerah imbuhan sebesar kurang lebih 6188 km^2.

5.3.2 Fluktuasi TDS, EC, dan Temperatur

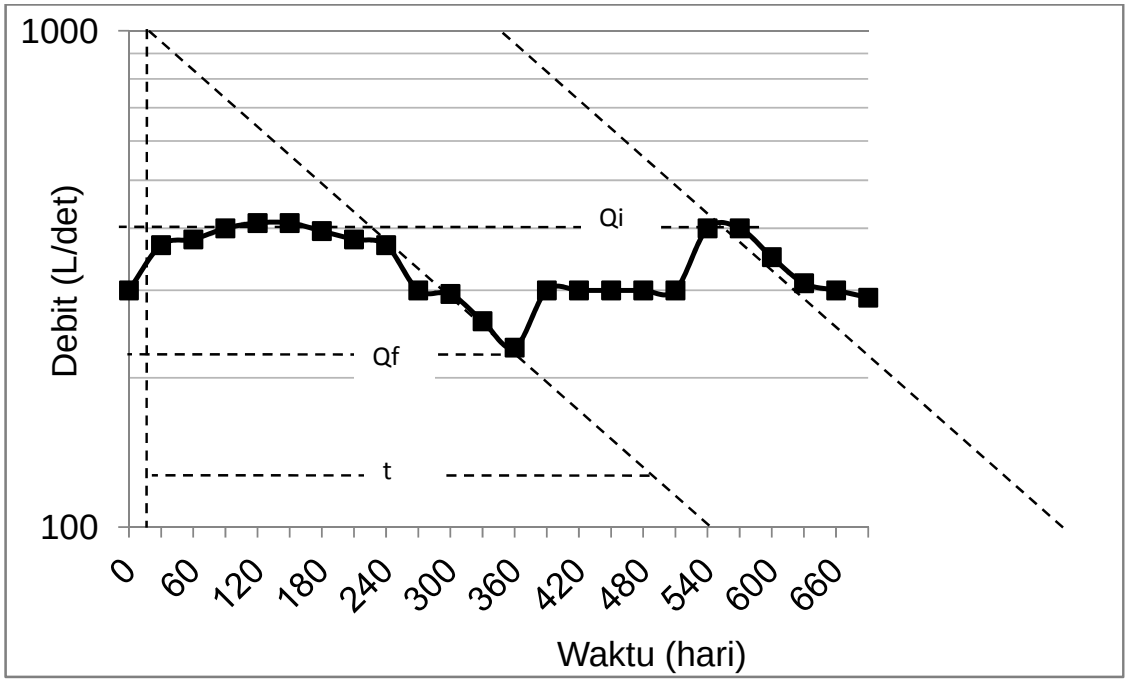
Nilai TDS mata air Telaga Remis pada musim kemarau adalah 2 kali lebih tinggi dibanding pada musim hujan, sebagaimana ditampilkan pada **Error! Reference source not found.**. Kondisi yang mirip juga ditunjukkan oleh EC, yang memperlihatkan peningkatan nilai EC 1,7 kali. Perilaku fluktuasi kedua parameter tersebut relatif sama dengan membentuk xxx fasa:

- Fasa Pengenceran : Januari - April 2006.
- Fasa Pemulihan : Mei 2006.
- Fasa Pelarutan : Juni 2006 – Februari 2007.
- Fasa Pengenceran : Maret - Agustus 2007
- Fasa pemulihan : September - Desember 2007.



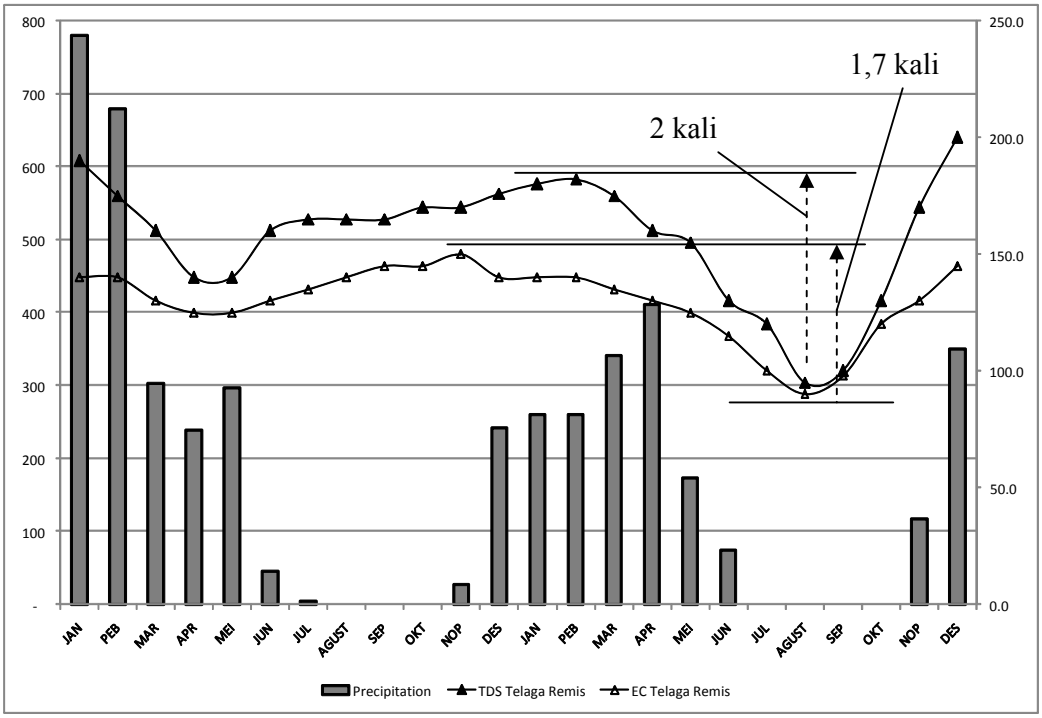
Gambar 65 Plot berurut waktu antara debit (sumbu y kanan) dan curah hujan (sumber y kiri) di lokasi Mata Air Telaga Remis

Dari uraian diatas dapat dihitung bahwa fasa pelarutan mineral menyebabkan nilai TDS dan EC meningkat dalam waktu 6 bulan setelah titik curah hujan terendah. Kemudian kedua nilai tersebut mulai menurun kembali sejalan dengan proses pengenceran oleh air hujan, dalam waktu 4 bulan setelah dimulainya musim hujan. Dengan demikian fasa pengenceran juga lebih cepat dibanding fasa pelarutan. Dari kondisi tersebut dapat diinterpretasikan bahwa imbuhan air hujan berlangsung lebih cepat dibanding lama waktu kontak air tanah di dalam akifer. Respon yang tidak instan tersebut mengindikasikan terdapat kombinasi antara media pori dan rekahan pada sistem akifer, sesuai dengan pendapat Singhal dan Gupta (2005).



Gambar 66 Plot semilog analisis hidrograf debit Mata Air Telaga Remis

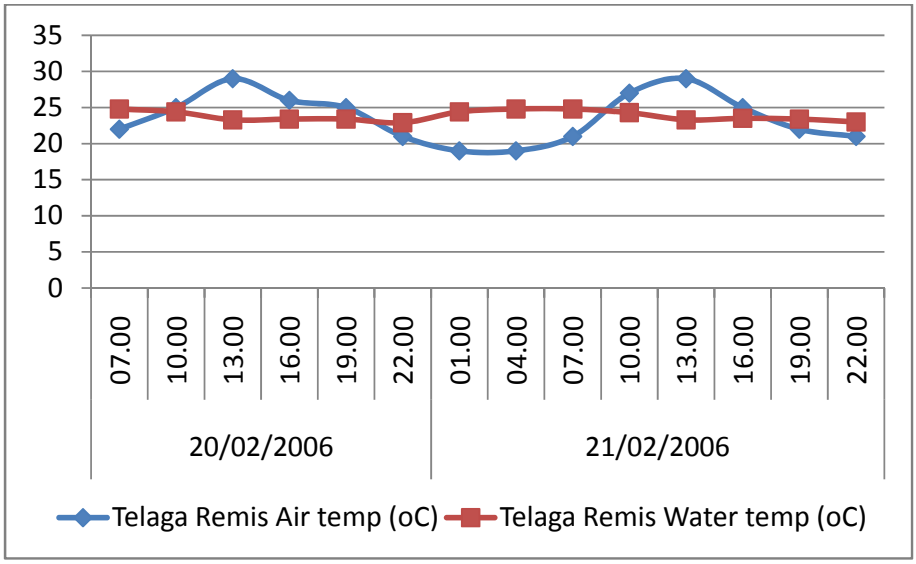
Observasi selama 24 jam terhadap suhu air tanah pada mata air dan suhu udara telah dilakukan pada 20 – 21 February 2006 (Tabel 22 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Telaga Remis). Hasilnya ditampilkan pada **Error! Reference source not found.**. Berdasarkan hasil pengukuran rata-ata suhu mata air adalah 23,8^{o}C, maksimum 24,8^{o}C, dan minimum 22,9^{o}C. Data lainnya, suhu udara rata-ratanya adalah 23,6^{o}C, maksimum 29.0^{o}C dan minimum 19,0^{o}C. Pada waktu-waktu tertentu terjadi perbedaan suhu. Suhu air tanah lebih rendah dibanding suhu udara pada pkl 13.00 – 19.00. Sebaliknya suhu air tanah lebih tinggi dibanding suhu udara pada pkl. 22.00-07.00 dan 19.00 – 22.00.



Gambar 67 Plot berurut waktu antara TDS dan EC (sumbu y kanan); dan curah hujan (sumbu y kiri) di lokasi Mata Air Telaga Remis.

Tabel 22 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Telaga Remis

	Date	20/02/2006						21/02/2006							
Spring	Temp/Time	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00
Telaga Remis	Air temp (^{o}C)	22	25	29	26	25	21	19	19	21	27	29	25	22	21
	Water temp (^{o}C)	24,8	24,4	23,3	23,4	23,4	22,9	24,4	24,8	24,8	24,3	23,3	23,5	23,4	23
	|Del T|	2,8	0,6	5,7	2,6	1,6	1,9	5,4	5,8	3,8	2,7	5,7	1,5	1,4	2



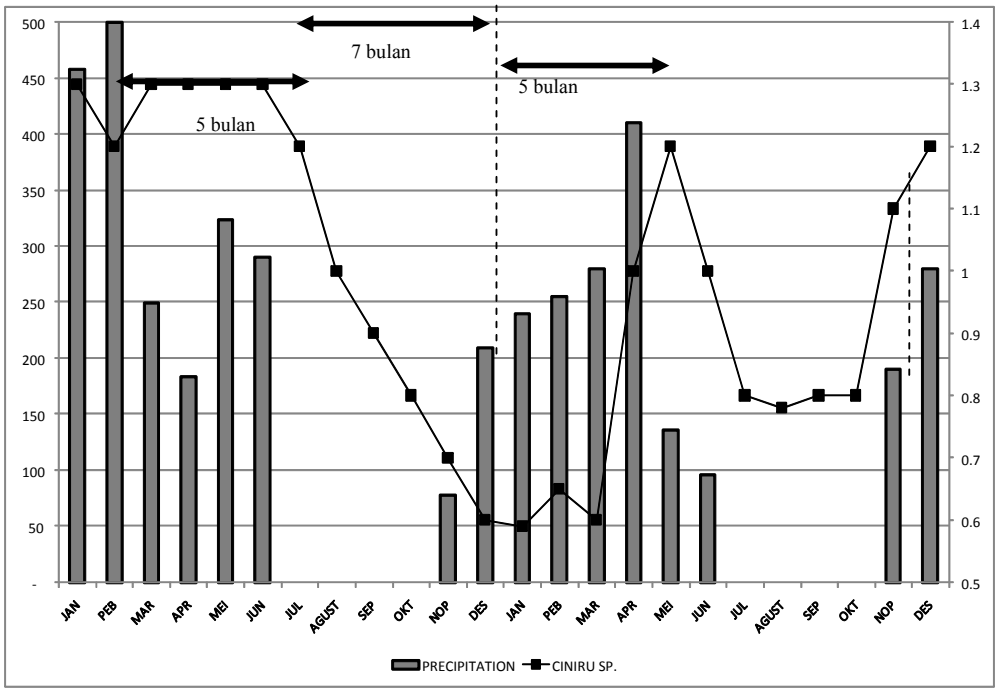
Gambar 68 Plot berurut waktu hasil pengukuran temperatur air pada mata air dan temperatur udara di Mata Air Telaga Remis.

5.4 Mata Air Ciuyah

5.4.1 Hidrograf Debit Mata Air dengan Curah Hujan

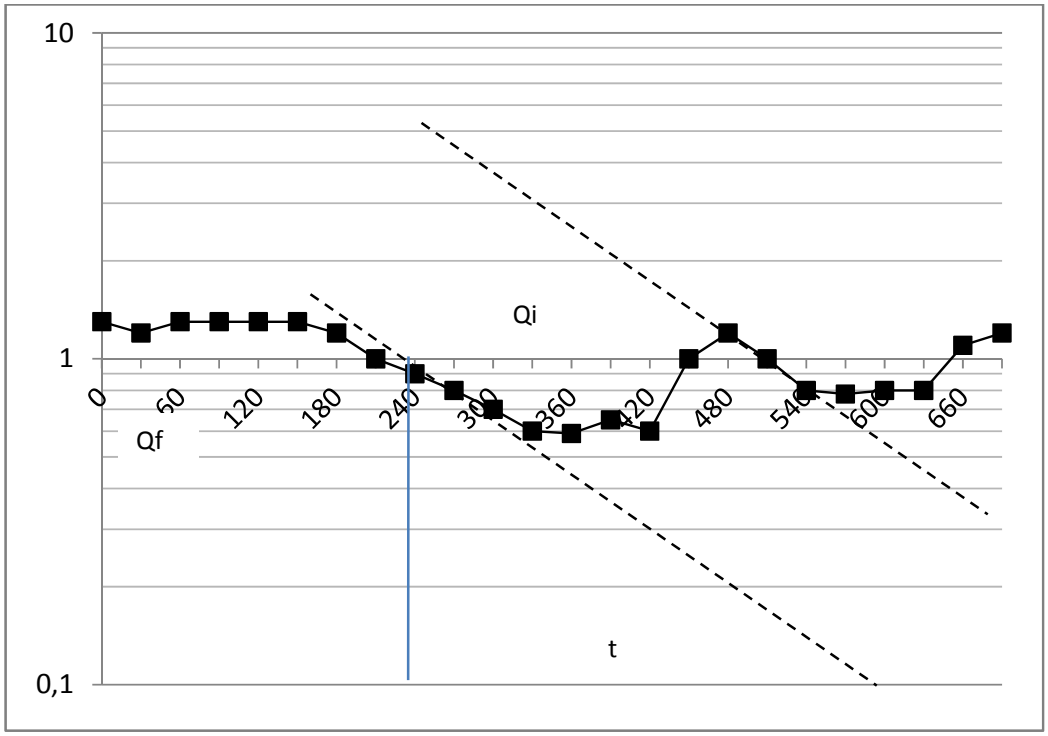
Untuk analisis hidrograf ini, data curah hujan diambil dari stasiun Ciniru pada elevasi 250 mdpl. **Error! Reference source not found.** di bawah ini menayangkan fluktuasi debit mata air dan curah hujan di lokasi Mata Air Ciuyah. Beda waktu antara puncak curah hujan dan puncak debit mata air adalah 1 bulan. Debit mata air terendah terjadi 7 bulan sejak awal musim kemarau.

Mencermati kondisi diatas, maka dapat disebutkan bahwa debit mata air dipengaruhi oleh curah hujan. Waktu resesi yang panjang mencerminkan pengurasan dari simpanan (*storage*) akifer yang lambat. Akifer diduga memiliki suplai air dari sumber lainnya, diindikasikan dengan debit terendah muncul setelah 7 bulan. Sumber lainnya tersebut diperkirakan adalah air tanah bersuhu panas dari akifer yang lebih dalam. Air panas tersebut bercampur dengan air tanah bersuhu normal. Pencampuran dengan air hipertermal diindikasikan oleh TDS yang bervariasi dari 2000 ppm, 6000 ppm, hingga 12.000 ppm di musim kemarau.



Gambar 69 Plot berurut waktu antara debit mata air Ciuyah (sumbu y kanan) dan curah hujan (sumber y kiri).

Dari **Error! Reference source not found.** didapatkan t = 360 hari, Q_i = 1,25 L/det dan Q_f = 0,6 L/det, sehingga (Q_i - Q_f) adalah 0,65 L/det. Dengan demikian didapatkan R sebesar kurang lebih 36.919.096 m^3. Hasil perhitungan R tersebut bila dibagi dengan curah hujan rata-rata selama 2 tahun (2006 dan 2007), maka didapatkan luas daerah imbuhan sebesar kurang lebih 21,9 km^2.



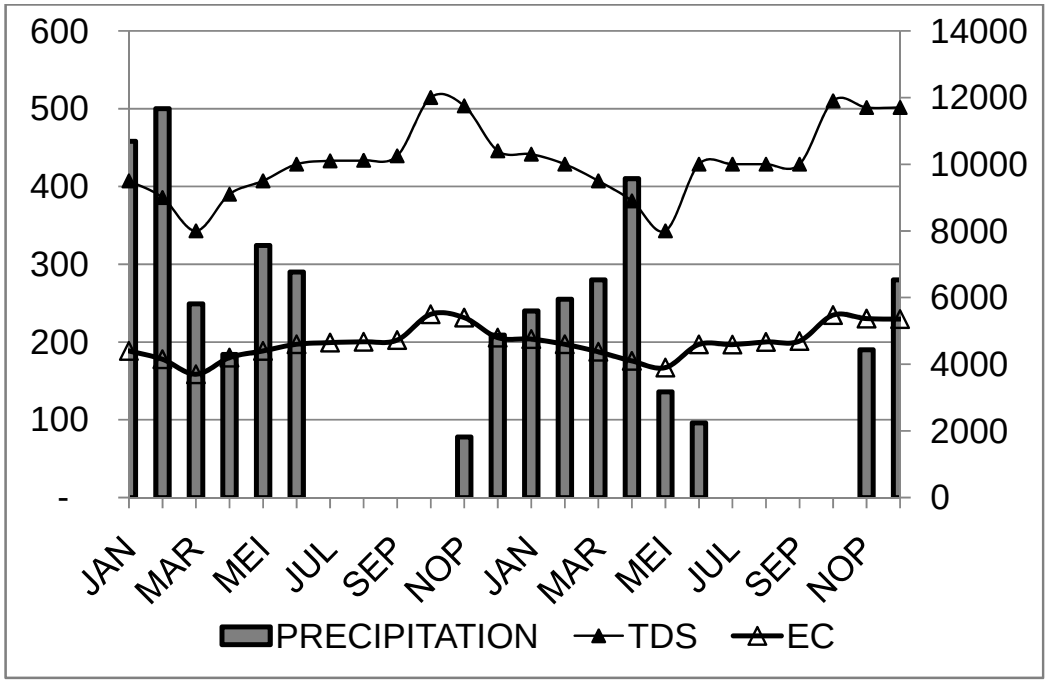
Gambar 70 Plot semilog analisis hidrograf debit Mata Air Ciuyah

5.4.2 Fluktuasi TDS, EC, dan Temperatur

Nilai TDS pada musim kemarau 2 kali lebih tinggi dibanding pada musim hujan. (**Error! Reference source not found.**), dari 6000 ppm menjadi 12,000 ppm. Fluktuasi ini terdiri dari 4 fasa, sebagai berikut:

- Fasa pengenceran : Januari - Maret 2006,
- Fasa pemulihan : April - Oktober 2006,
- Fasa pelarutan : November - Mei 2007,
- Fasa pengenceran : Juni - Desember 2007.

Pada plot terdapat 2 bentuk kurva, yakni kurva gradual dan kurva terjal. Kurva gradual / landai diperkirakan karena adanya interaksi antara air bersuhu normal dengan air bersuhu tinggi. Kurva dengan lereng terjal diperkirakan karena adanya aliran / fluks air panas yang dilepaskan secara periodik dari simpanan (*storage*) akifer.



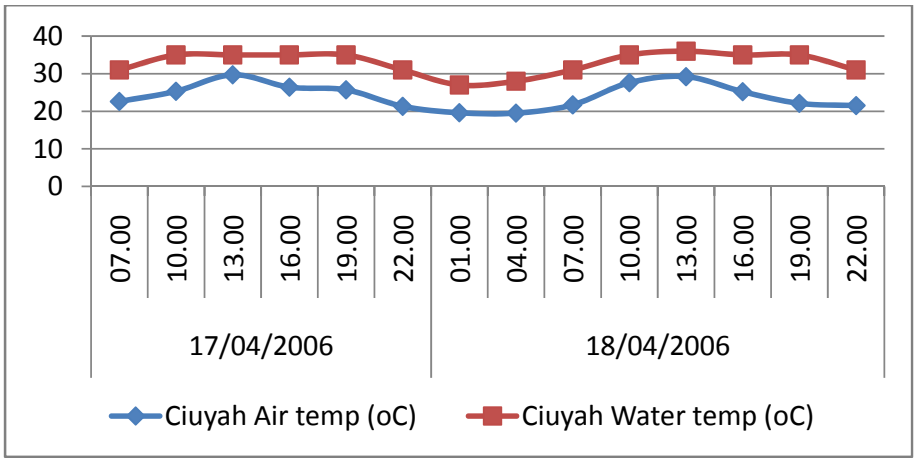
Gambar 71 Plot berurut waktu antara TDS dan EC (sumbu vertical axis); dan curah hujan (sumbu vertikal kiri) Mata Air Ciuyah.

Observasi selama 24 jam terhadap suhu air tanah pada mata air dan suhu udara telah dilakukan pada 17 – 18 April 2008 (

Tabel 23). Hasilnya ditampilkan pada **Error! Reference source not found.**. Berdasarkan hasil pengukuran rata-rata suhu mata air adalah 32,9^{o}C, maksimum 36,0^{o}C, dan minimum 27,0^{o}C. Data lainnya, suhu udara rata-ratanya adalah 24,1^{o}C, maksimum 36,0^{o}C, dan minimum 27,0^{o}C. Pada waktu-waktu tertentu terjadi perbedaan suhu. Suhu air tanah lebih rendah dibanding suhu udara pada pkl 13.00 – 19.00. Sebaliknya suhu air tanah lebih tinggi dibanding suhu udara pada pkl. 22.00-07.00 dan 19.00 – 22.00. Dari grafik yang ada, dapat disimpulkan bahwa mata air tetap bersifat hipertermal, atau suhu air tanah lebih tinggi dari suhu udara lokal.

Tabel 23 Pengukuran suhu air tanah dan udara selama 24 jam di lokasi Mata Air Ciuyah

	Date	17/04/2006								18/04/2006					
Spring	Temp/Time	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00
	Air temp (°C)	22,6	25,3	29,7	26,4	25,7	21,3	19,6	19,5	21,7	27,6	29,2	25,2	22,1	21,5
Ciuyah	Water temp (°C)	31	35	35	35	35	31	27	28	31	35	36	35	35	31
	|Del T|	8,4	9,7	5,3	8,6	9,3	9,7	7,4	8,5	9,3	7,4	6,8	9,8	12,9	9,5



Gambar 72 Plot berurut waktu hasil pengukuran temperatur air pada mata air dan temperatur udara di Mata Air Ciuyah

5.5 Catatan

Ketiga mata air sebagai contoh kasus menunjukkan korelasi yang relatif lemah terhadap curah hujan. Mata air tersebut memiliki waktu tinggal air tanah (*groundwater residence time*) yang relatif lama, walaupun masih dalam skala waktu bulan. Namun demikian, kondisi tidak ada hujan tidak akan mempengaruhi akifer secara drastis.

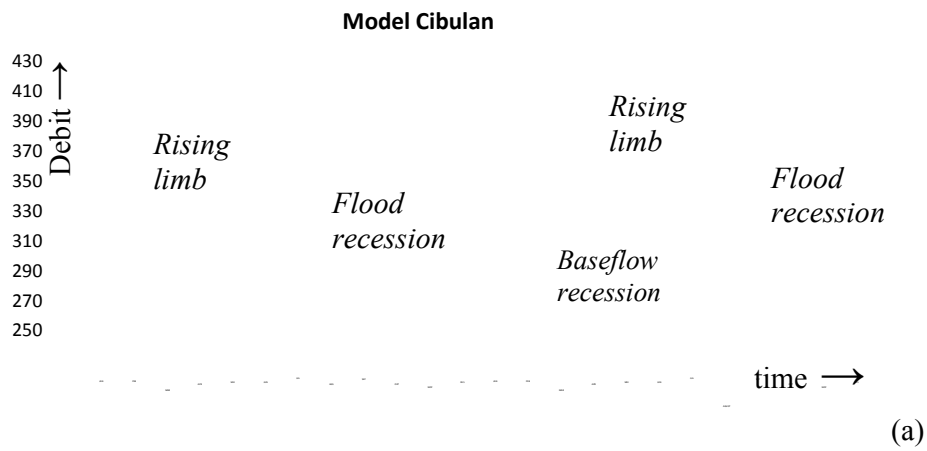
Model hidrograf mata air di kawasan gunung api masih sangat jarang ditemui sebagai rujukan. Sebagian besar model yang tersedia adalah untuk sistem akifer batugamping karst. Dalam riset ini penulis mencoba mengusulkan pola hidrograf mata air pada sistem akifer endapan gunung api, khususnya untuk daerah peminatan G. Ciremai. Model hidrograf disampaikan pada **Error! Reference source not found.**.

Pada model di bawah ini disampaikan 2 kurva tipe, yakni tipe kurva landai (a) dan tipe kurva terjal (b). Kurva Tipe a dipengaruhi oleh kombinasi antara sistem akifer media pori dan media rekahan. Kurva Tipe b dikendalikan oleh sistem akifer media rekahan yang lebih dominan. Kondisi yang membedakan antara model a dan b adalah bentuk kurva *baseflow recession* yang menggambarkan kemampuan akifer untuk menyimpan air pada saat musim kemarau. Model menggambarkan kurva *baseflow recession* yang sangat singkat, sementara untuk model a masih terdapat tenggang waktu terjadinya proses tersebut. Dengan bentuk kurva seperti demikian, maka dapat diharapkan mata air dengan kurva seperti model b dapat lebih resisten terhadap musim kemarau dibanding mata air model a. Sebagai pembanding, kedua tipe kurva ini berbeda bila dibandingkan dengan hidrograf debit mata air karst dengan sistem akifer rekahan murni (c) yang menggambarkan sistem imbuhan dan pengurasan yang cepat.

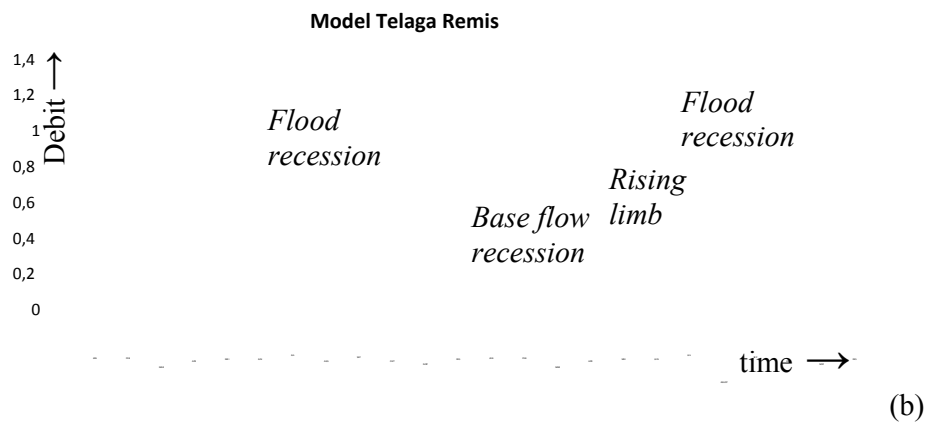
Birk et.al (2004) menyatakan bahwa titik puncak tunggal pada hidrograf debit atau EC menggambarkan adanya proses imbuhan yang terpusat (*localized*). Imbuhan yang terpusat salah satunya terjadi pada media rekahan murni, misalnya imbuhan pada lubang/depresi berjenis dolina, uvala, atau rekahan memanjang yang sampai ke permukaan. Masih menurut peneliti tersebut, dengan demikian bila ada hidrograf dengan peningkatan debit yang gradual hanya bisa terjadi bila imbuhan bersifat menyebar (difusif) pada area yang relatif luas. Hal ini dapat terjadi pada akifer media pori. Pendapat yang sama juga disampaikan oleh Puradimaja dan Santoso (2005) yang menjelaskan pola respon pisometri (hidrograf) debit mata air Gua Bribin di Gunung Kidul Jawa Tengah.

Hasil analisis hidrograf untuk mengitung luas daerah imbuhan dapat terdiri dari 3725 km^2 untuk Cibulan dengan volume imbuhan $8{,}2x10^9$ m^3, 6188 km^2 untuk

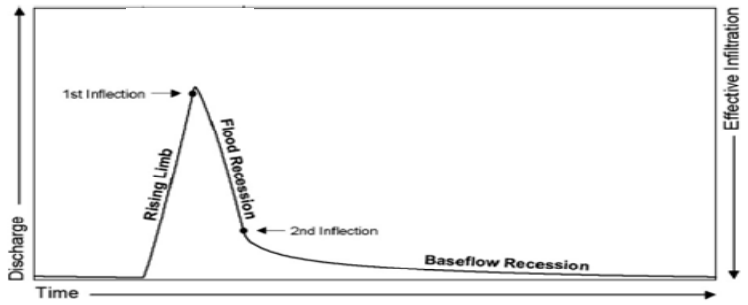
Telaga Remis dengan volume imbuhan 14,5x10^9 m^3, dan 22 km^2 untuk Ciuyah dengan volume imbuhan 36,9x10^6 m^3. Ketiganya dengan menggunakan curah hujan rata-rata selama 2 tahun (2006-2007). Tabel berikut ini menampilkan rangkuman hasil perhitungan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 73 Usulan model hidrograf mata air pada sistem akifer G. Ciremai (a) dan (b) dan model hidrograf sistem akifer media rekahan (c)

Tabel 24 Rangkuman hasil perhitungan

Cibulan

R (m3)	CH (mm)	A (mm2)	A (km2)
8.283.130.435	248,92	3.327.627.524.820.270	3.328
8.283.130.435	195,83	4.229.755.622.112.350	4.230
8.283.130.435	222,38	3.724.847.862.746.540	3.725
8.283.130.435	2350	352.473.635.522.664	352
8.283.130.435	2987	277.306.007.190.579	277
8.283.130.435	5337	155.201.994.281.106	155

Telaga Remis

R (m3)	CH (mm)	A (mm2)	A (km2)
14.495.478.261	218,25	6.641.685.342.895.560	6.642
14.495.478.261	250,25	5.792.398.905.442.380	5.792
14.495.478.261	234,25	6.188.037.678.065.980	6.188
14.495.478.261	2619	553.473.778.574.630	553
14.495.478.261	3003	482.699.908.786.865	483
14.495.478.261	2811	515.669.806.505.499	516

Ciuyah

R (m3)	CH (mm)	A (mm2)	A (km2)
36.919.096	191	19.329.369.451.400	19
36.919.096	144,75	25.505.420.139.671	26
36.919.096	167,88	21.992.015.280.521	22
36.919.096	2292	1.610.780.787.617	2
36.919.096	1737	2.125.451.678.306	2
36.919.096	2014,5	1.832.667.940.043	2

BAB 6 KESIMPULAN

6.1 Sistem Hidrogeologi

Hasil analisis hidrokimia telah mengidentifikasi beberapa faktor yang mengendalikan variasi kualitas air tanah di lereng G. Ciremai. Sistem akifer gunung api menerima imbuhan di daerah yang tinggi kemudian air tanah muncul di bagian kaki gunung dalam bentuk mata air. Berdasarkan bentuk-bentuk hidrograf yang menunjukkan peningkatan debit mata air secara gradual, maka diperkirakan proses imbuhan berlangsung difusif atau tersebar dalam wilayah yang luas pada media pori.

Sejalan dengan interaksi antara air tanah dengan akifer di bawah permukaan, terjadi perubahan/evolusi komposisi kimia air tanah. Fasies hidrokimia yang dominan secara berurut adalah:

- Fasies ion netral,
- Fasies magnesium dan kalsium bikarbonat,
- Fasies natrium klorida.

Ketiga fasies besar tersebut menandakan adanya 3 pengaruh dominan, yang dapat diurutkan dari elevasi tinggi ke rendah sebagai berikut:

- pengaruh air meteorik pada air tanah dalam sistem akifer endapan gunung api
- pengaruh pencampuran antara air tanah meteorik dengan air tanah hipertermal
- pengaruh air hipertermal murni dan lingkungan sedimen laut

Analisis klaster memperlihatkan hasil yang sejalan dengan pembagian fasies diatas. Analisis tersebut menghasilkan 3 kelompok besar contoh air yang memiliki kemiripan, sebagaimana diagram berikut:

Total contoh air tanah 140 mata air

- Klaster 1 (C1): 5 mata air (4%)
- Klaster 2 (C2): 135 mata air (96%)
  - Klaster 2a (C2a)
    - Klaster 2a1 (C2a1) 130 mata air (93%)
    - Klaster 2a2 (C2a1) 3 mata air (2%)
  - Klaster 2b (C2b) 2 mata air (1%)

Pemisahan antara C1 dan C2 mengindikasikan bahwa contoh air tersebut berbeda dari sifat hidrokimianya. Bila dicocokkan dengan analisis kimia pada Diagram Piper, C1 adalah mata air yang dominan karakter batuan sedimen, sementara C2 dominan endapan gunung api. C1 dicirikan oleh kandungan klorida dan nilai TDS yang tinggi, sementara C2 memiliki kandungan bikarbonat dominan. Lebih rinci lagi, C2 dibagi menjadi C2a dan C2b berdasarkan komposisi kation utamanya. C2a diperkaya oleh Ca dan Mg, dinotasikan C2a1 dan C2a2 secara berurutan. Kemudian C2b diperkaya oleh Na dengan peningkatan konsentrasi klorida.

Hasil dari AKP menunjukkan separasi contoh air tanah yang mendukung dengan hasil diatas. Berdasarkan hasil analisisnya terdapat air tanah yang dikendalikan oleh elevasi pada Kuadran I dan debit yang tinggi pada Kuadran IV. Kedua kuadran tersebut berisi contoh air tanah mesotermal dengan TDS dan ion utama normal. Sebaliknya pada Kuadran III terdapat contoh air asin (*saline water*) hipertermal. Kuadran ini dikendalikan oleh TDS, EC, dan ion utama, khususnya klorida. Berikut ini merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi komposisi kimia air tanah:

- Komposisi endapan gunung api
- Konduktivitas hidrolik endapan gunung api yang tinggi karena adanya media rekahan
- Sumber panas dari proses volkanisme dan interaksi dengan sedimen laut

Tabel 25 Resume analisis multivariabel

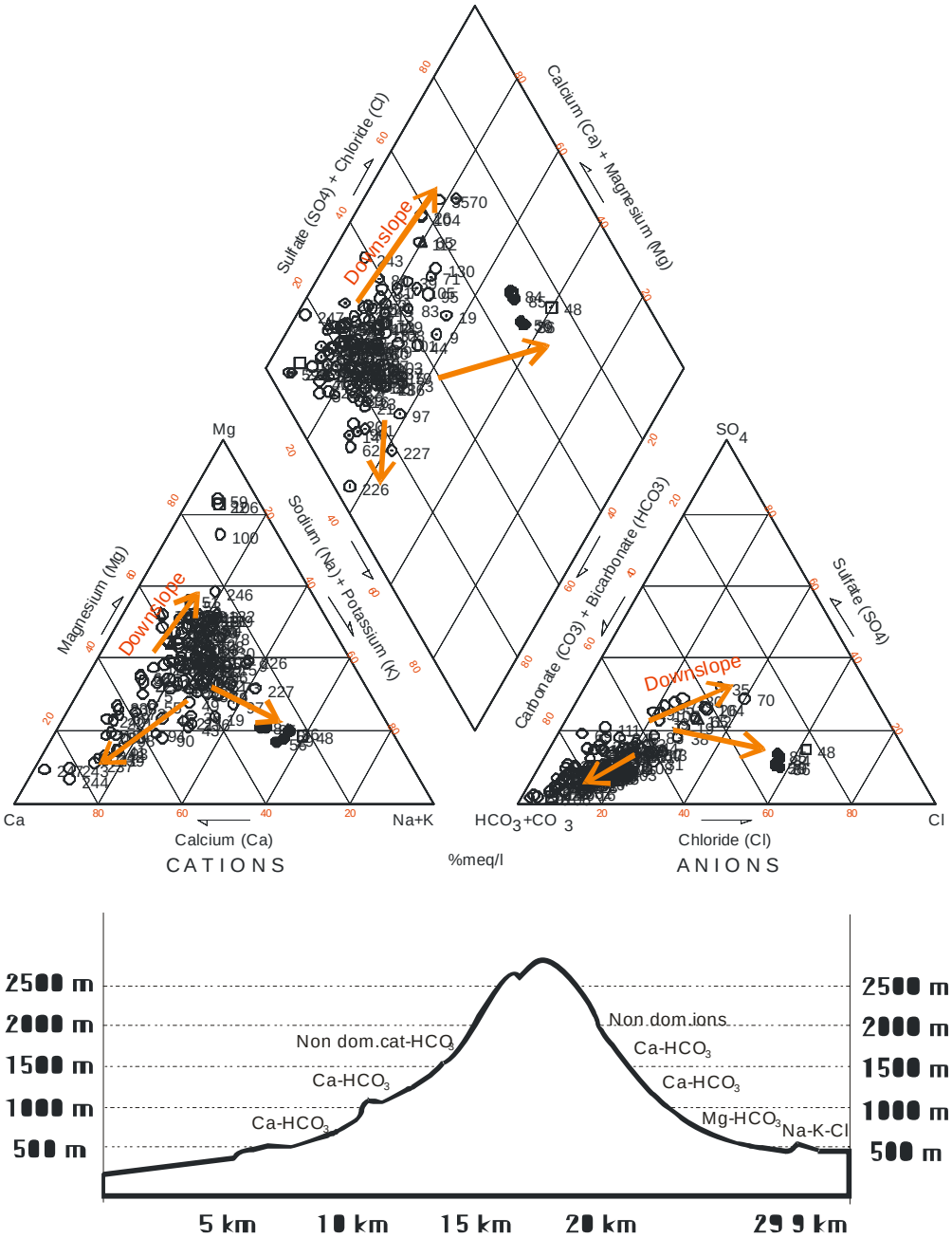
Fasies air tanah (Piper Diagram)	Klasifikasi air tanah (Analisis Klaster)	Tingkat Pengaruh Variabel (Analisis Komponen Prinsipal)
Fasies 1 Kation netral bikarbonat: dominan air meteorik, akifer tak tertekan, relatif dangkal.	Klaster 1 Temperatur, TDS, dan EC normal, dominan air meteorik, akifer tak tertekan, relatif dangkal.	Kuadran 1 dan 4 Debit besar pengaruh media rekahan dari elevasi tinggi ke rendah, pengaruh air meteorik, mengalir pada akifer tak tertekan, relatif dangkal.
Fasies 2 Magnesium-sulfat: dominan air meteorik, interaksi dengan akifer gunung api, akifer tak tertekan, relatif dangkal.	Klaster 2 Temperatur, TDS, dan EC menengah, dominan air meteorik, interaksi dengan akifer gunung api, akifer tak tertekan, relatif dangkal.	Kuadran 2 dan 3 Hadirnya pengaruh klorida dari sedimen laut, akifer relatif dalam, dengan temperatur, TDS, dan EC tinggi.
Fasies 3 Magnesium-klorida: dominan air formasi, interaksi dengan sedimen laut, relatif dalam.	Klaster 3 Temperatur, TDS, dan EC anomali, dominan air formasi, interaksi dengan sedimen laut, relatif dalam.	

6.2 Evolusi Air tanah

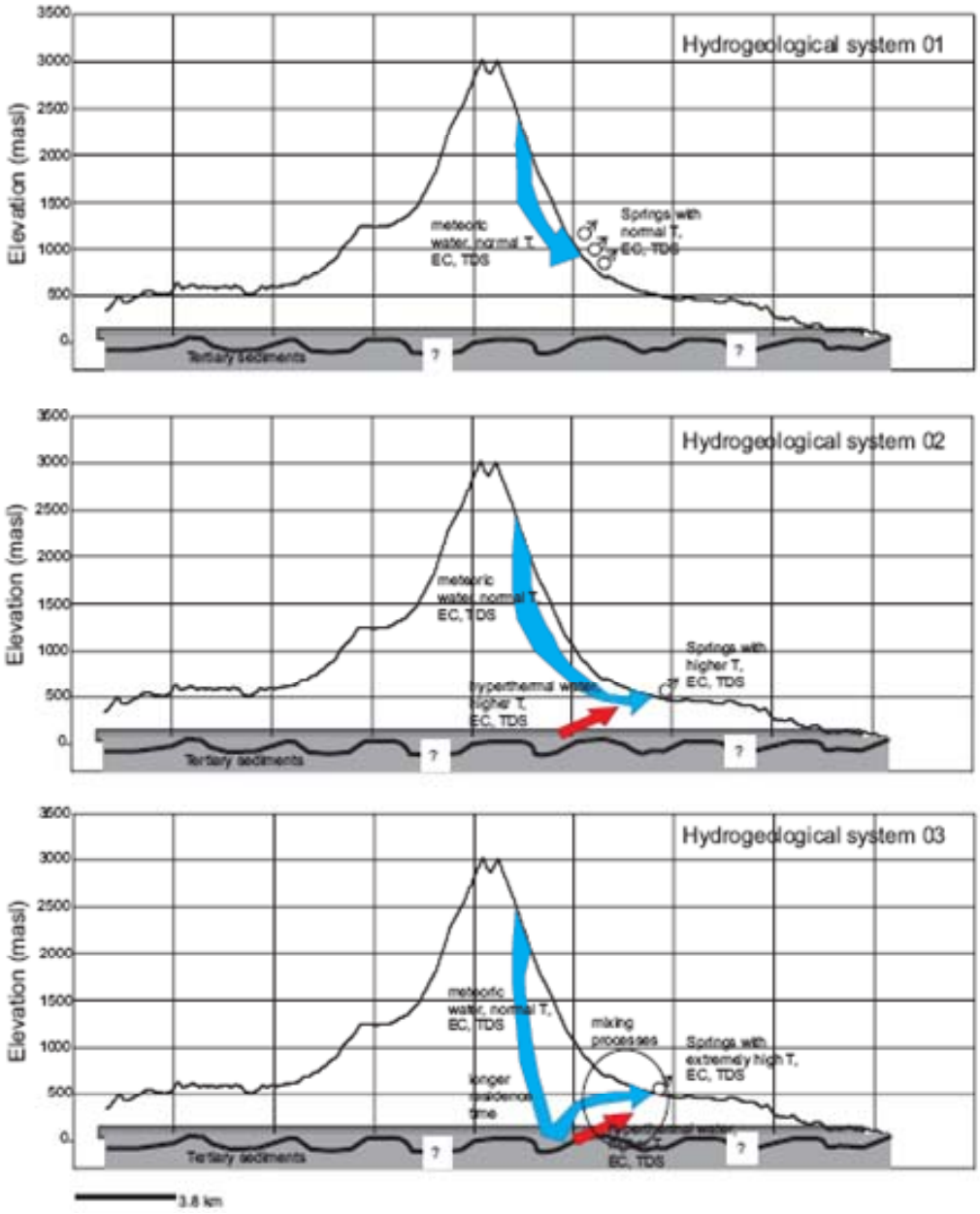
Evolusi air tanah berawal dari fasies ion netral (Fasies A) sebagai jenis air yang sama dengan fasies air hujan. Kemudian air terdiferensiasi menjadi 3 fasies dari elevasi tinggi ke rendah, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 74. Variasi lain dari fasies ini adalah kation netral bikarbonat (Fasies B1). Fasies berikutnya adalah kalsium bikarbonat (Fasies B2) hasil kontak dengan batuan yang kaya plagioklas. Air kemudian berubah menjadi fasies magnesium bikarbonat (Tipe B3). Air ini diperkaya oleh batuan ferromagnesian. Selanjutnya air mengalir ke akifer yang lebih dalam serta berinteraksi dengan batuan sedimen menjadikan fasiesnya berubah menjadi natrium-kalium-klorida (Fasies C).

Masing-masing fasies diatas mencerminkan *Hydrogeological System* (HS) atau sistem hidrogeologi tertentu (Gambar 75). HS1 berkaitan dengan air Fasies A dan B. Air tanah pada sistem ini masih didominasi oleh air meteorik atau disebut pula air muda atau disebut *immature water* dalam triangular plot oleh Herdianita dan

Priadi (2008). HS2 dan HS3 terkait dengan Fasies C. Kedua sistem tersebut tergolong air tua (*mature waters*). HS2 diperkirakan merupakan interaksi antara sistem air tanah mesotermal dan hipertermal. Sementara HS3 mengalir pada akifer yang lebih dalam dibandingkan HS2. Sistem ini merupakan air tanah hipertermal yang berkorelasi dengan sedimen laut, berupa Formasi Kaliwangu dan Halang. Lapisan-lapisan yang berada di bawah endapan gunung api Ciremai inilah yang memberikan konsentrasi klorida.



Gambar 74 Skematik evolusi air tanah berdasarkan fasies air tanah



Gambar 75 Skematik sistem hidrogeologi berdasarkan sifat fisik dan kimia air

6.3 Originalitas

Kajian hidrogeologi berbasis analisis klaster dan komponen prinsipal telah lama digunakan dalam publikasi-publikasi dari luar negeri. Namun demikian, metoda ini belum banyak diaplikasikan untuk menganalisis sistem hidrogeologi pada

sistem akifer endapan gunung api di Indonesia. Di Indonesia sendiri, beberapa periset yang telah menggunakan metoda ini untuk menganalisis contoh air tanah secara masal belum banyak, diantaranya yang tercatat adalah Sunarwan (1999) dan Notosiswoyo (1989). Keduanya meneliti di G. Tangkubanparahu.

Hal lainnya adalah analisis hidrograf sifat fisik dan kimia air tanah, meliputi debit, TDS, dan EC belum dilakukan secara terinci. Walaupun teknik ini banyak dilakukan di dalam publikasi-publikasi dari benua Eropa dan Amerika. Bahkan setelah melalui pencarian rujukan, belum banyak juga publikasi yang menggambarkan bentuk hidrograf debit mata air pada sistem akifer endapan gunung api. Hal ini tentunya menjadi hal yang menarik untuk dikaji lebih dalam.

Dari uraian di atas dapat disampaikan butir-butir berikut ini sebagai originalitas riset ini:

- Analisis fasies hidrokimia air tanah yang dikombinasikan dengan Analisis Klaster dan Analisis Komponen Prinsipal untuk mengidentifikasi proses evolusi air tanah pada sistem akifer endapan gunung api. Proses ini mampu memisahkan sistem hidrogeologi endapan gunung api dan sedimen laut.
- Analisis hidrograf debit, TDS, EC pada mata air untuk mengidentifikasi perilaku air tanah dalam sistem akifer endapan gunung api skala waktu 2 tahunan. Proses ini mampu memisahkan perilaku air tanah yang bersirkulasi pada akifer tak tertekan dengan sistem terbuka dengan akifer akifer tertekan dengan sistem tertutup. Analisis yang sama juga dapat mendukung perhitungan estimasi waktu pengaliran air tanah dan luas kawasan imbuhan.

DAFTAR PUSTAKA

Badrudin, M. 1988. Penyelidikan Geokimia/Pengukuran COSPEC di G. Galunggung, G. Tangkubanparahu, G. Tampomas dan G. Ciremai, Jawa Barat. Direktorat Vulkanologi.

Birk, S. Liedl, R. Sauter, M. 2004. Identification of Localised Recharge and Conduit Flow by Combined Analysis of Hydraulic and Physico-Chemical Spring Responses (Urenbrunnen, SW-Germany). Journal of Hydrology 286. p. 179-193.

Cas and Wright. 1980. Volcanic Rocks. McGraw-Hill.

Chow, V.T. 1964. Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company.

Cloutier, V, Lefebvre, R, Therrien, R, Savard, M.M. 2008. Multivariate Statistical Analysis of Geochemical Data as Indicative of the Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in a Sedimentary Rock Aquifer System. Journal of Hydrology (2008) 353. p. 294– 313. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.02.015.

Dam, M. 1994. The Late Quarternary Evolution of The Bandung Basin, West Java. Indonesia. Amsterdam. The Netherlands.

Davis, J.C. 1986. Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons Inc., New York.

Deptamben. 1979. Data Dasar Gunungapi Indonesia. Bandung: Deptamben.

Desmarais, K., Rojstaczer, S. 2002. Inferring Source Waters from Measurements of Carbonate Spring Response to Storms. Journal of Hydrology no 260. pp 118-134.

Djuri. 1995. Peta Geologi Regional Lembar Arjawinangun. Scale 1:100.000. Bandung: Puslitbang Geologi.

Domenico, P., and Schwartz. 1990. Physical and Chemical Properties of Groundwater. US: McGraw-Hill.

Drever, J.I. 1988. The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall.

Effendi, A. 1974. Peta Geologi Lembar Bogor. Skala 1:100.000. Bandung: Puslitbang Geologi.

Farnham, I.M, Johannesson, K.H, Singh, A.K, Hodge, V.F, Stetzenbach, K.J. 2003. Factor Analytical Approaches for Evaluating Groundwater Trace Element Chemistry Data. Analytical Chimica Acta 490, p. 123–138.

Galanos, I. and Rokos, D. 2006. A statistical approach in investigating the hydrogeological significance of remotely sensed lineaments in the crystalline mountainous terrain of the island of Naxos, Greece. Hydrogeology Journal (2006) 14. pp 1569–1581. DOI 10.1007/s10040-006-0043-2.

Gautama, R. 1995. Hak Pengawasan Sumber Air dan Zona Konservasi Airtanah untuk Menjamin Kelestarian. Seminar Sehari Airtanah Cekungan Bandung. Bandung.: ITB.

Geyh, M. 1990. Isotopic Hydrological Study in the Bandung Basin Indonesia. Project CTA 108. Environmental Geology for Land Use and Regional Planning.

Guller, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., and Turner, K. A. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal (10). 455-474.

Hem, J. D. 1980. Hydrochemistry of Natural Waters. USGS Water Supply Papers.

Herdianita, N.R, Priadi, B. 2008. The Chemical Compositions of Thermal Waters at Ciarinem and Cilayu, Pameungpeuk, West Java – Indonesia. ITB Journal of Science. Vol. 40 A. No. 1 (in press).

Husein and Suparan. 1990. Pengukuran Graviti G. Ciremai. Direktorat Vulkanologi.

Irawan, D.E and Puradimaja, D.J. 2006. The Hydrogeology of The Volcanic Spring Belt, East Slope of Gunung Ciremai, West Java, Indonesia, Intenational Association of Engineering Geologists Congress. Oct 2006.

Irawan, D.E. 2001. Characterisation of Aquifer System and Groundwater Flow on Stratovolcano. Case Study: Spring Zone, East Slope of Mt Ciremai, Cilimus-Jalaksana. Master thesis. Dept. of Geology. ITB.

IWACO-WASECO. 1990. West Java Provincial Water Sources Master Plan for Water Supply, Kabupaten Bandung. Jakarta: Directorate General Cipta Karya.

IWACO-WASECO. 1990. West Java Provincial Water Sources Master Plan for Water Supply, Kabupaten Serang. Groundwater Resources. Jakarta: Directorate General Cipta Karya.

IWACO-WASECO. 1990. West Java Provincial Water Sources Master Plan for Water Supply, Kabupaten Bandung. Jakarta: Directorate General Cipta Karya.

Join, J.L, Coudray, J, Longworth, K. 1997. Using Principal Component Analysis and Na/Cl Ratios to Trace Groundwater Circulation in a Volcanic Island: The Example of Reunion. Journal of Hydrogeology 190. p. 1-18.

KemenLH. 1997. Studi Pendayagunaan Sumberdaya Air pada Daerah Aliran Sungai (DAS) di Kawasan Bogor – Puncak – Cianjur (Bopunjur).

Jakarta: Kementrian Lingkungan Hidup RI kerjasama dengan LPM ITB.

Kim, T, Moon, D.C, Park, W.B, Park, K.H, Ko, G.W. 2007. Classification of springs of Jeju Island using cluster analysis of annual fluctuations in discharge variables: investigation of the regional groundwater system. Geosciences Journal. v. 11. n. 4, p. 397 – 413.

Koesoemadinata, R.P. and Hartono. 1981. Stratigrafi dan Sedimentasi Daerah Bandung. Prosiding Ikata Ahli Geologi Indonesia. Bandung: Ikatan Ahli Geologi Indonesia.

Kovacs, A. and Perrochet, P. 2008. A Quantitative Approach to Spring Hydrograph Decomposition. Journal of Hydrology. No. 352. pp 16-29.

Kusumadinata K. 1977. The geology of Ciremai. Direktorat Vulkanologi

Lattman LH and Parizek RR. 1964. Relationship between fracture traces and the occurrence of groundwater in carbonate rocks. Journal of Hydrology 2. pp 73–91.

Manga, M. 2001. Using Springs to Study Groundwater Flow and Active Geologic Processes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. v. 29. p. 201-228. doi:10.1146/annurev.earth.29.1.201.

Manga, M. 1999. On the Timescales Characterizing Groundwater Discharge at Springs. Journal of Hydrology 219. P. 56-69.

Marks, P. 1959. Stratigraphic Lexicon of Indonesia. Bandung.

Marpaung, J. 2003. Karakteristik Sistem Airtanah Daerah Gunungapi. Studi Kasus: Kompleks Gunungapi Tangkuban Perahu, Burangrang, dan Bukit Tunggul. Tesis magister. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Matthess, G. 1981. The Properties of Groundwater. McGraw-Hill.

McPhie J, Doyle MG, Allen RL. 1993. Volcanic Textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. Hobart: CODES. University of Tasmania 198.

Melloul, A, Collin, M. 1992. The 'Principal Components' Statistical Method as a Complementary Approach to Geochemical Methods in Water Quality Factor Identification; Application to the Coastal Plain Aquifer of Israel. Journal of Hydrology 140, p. 49–73.

Memon, B.A. 1995. Quantitative Analysis of Springs. Journal of Environmental Geology 26. p. 111-120.

Miyazaki, T. 1993. Water Flow in Soils. Marcel Dekker inc.

Notosiswoyo, S. 1989. Thermalwasser im Vulkangebiet Tangkuban Perahu bei Bandung. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfalischen Technischen Hoch schule Aachen.

Pacheo, FAL, Alencoao, AMP. 2005. Role of fratures in weathering of solid rocks: narrowing the gap between laboratory and field weathering. Journal of Hydrology 316. p. 248-265.

Piper, A. 1944. Graphical Representation of Chemical Data. USGS.

Puradimaja, DJ. 2006. Hidrogeologi Kawasan Karst dan Gunungapi di Indonesia. Pidato Guru Besar Institut Teknologi Bandung.

Puradimaja, DJ, Santoso, D. 2005. Detection of Bribin Underground River Stream Using Bristow Resistivity Method, The Leading Edge, The Society of Exploration Geophysics (SEG).

Puradimaja, DJ, Irawan, D.E., Hutasoit, L.M. 2003. Geological Control to Spring Emergence. Case Study: East Slope of Mt. Ciremai. Buletin Geologi. Vol 35 No 1. p. 15 – 23.

Puradimaja, DJ. 1991. ----------. Universite Montpellier. disertasi. tidak dipublikasikan.

Purbawinata, Kadarsetia, and Rakimin. 1991. Petrokimia G. Ciremai. Direktorat Vulkanologi.

Said H. 1984. Preliminary report of G.Ciremai Magnetic Investigation. Directorate of Volcanology.

Sander, P. 2007. Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. Hydrogeology Journal 15. pp 71–74. DOI 10.1007/s10040-006-0138 9.

Schot, P.P, van der Wal, J. 1992. Human Impact on Regional Groundwater Composition through Intervention in Natural Flow Patterns and Changes in Land Use. Journal of Hydrology 134, p. 297–313.

Silitonga and Masria. 1978. Peta Geologi Lembar Cirebon Sheet. skala 1:100.000.

Silitonga, P. 1973. Peta Geologi Lembar Bandung (scale 1:100.000). Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Silitonga. 1978. Peta Geologi Regional Lembar Cirebon Skala 1:100.000. Bandung: Puslitbang Geologi.

Singhal dan Gupta. 2005. Applied Hydrogeology of Fractured Aquifer. Kluwer Publishing.

Situmorang. 1995. Peta Geologi Gunung Ciremai, Bandung. Direktorat Vulkanologi Indonesia.

Situmorang. 1995. Peta Geologi Gunung Ciremai. Bandung: Direktorat Vulkanologi Indonesia.

SK.424/Menhut-II/04 October 19th 2004, Penetapan G. Ciremai sebagai Taman Nasional.

Smith, L. I. 2002. A Tutorial on Cluster Analysis. Retrieved April 17, 2006. from Math Dept Web Site: http://www.cs.montana.edu

Soetoyo and Hadisantono, R.D. 1992. Peta Geologi Gunungapi Tangkuban Perahu/Kompleks Gunungapi Sunda, Jawa Barat. Bandung: Direktorat Volkanologi.

StatSoft Inc. 2004. STATISTICA (Data Analysis Software System). Version 6.

Steinhorst, R.K. Williams, R.E. 1985. Discrimination of Groundwater Sources using Cluster Analysis, MANOVA, Canonical Analysis and Discriminant Analysis. Water Resources Research 21, p. 1149–1156.

Sudjatmiko. 1972. Peta Geologi Lembar Cianjur. Skala 1:100.000. Bandung: Puslitbang Geologi.

Sunarwan, B. 1999. Penerapan Metoda Hidrokimia – Isotop Oksigen – 18 (18O), Deuterium (2H) dan Tritium (3H) dalam Karakterisasi Akifer Airtanah pada Sistem Akifer Bahan Volkanik. Studi Kasus Kawasan Padalarang – Cimahi – Lembang, Bandung. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Tabachnick, B.G. and Fidell, L.S. (2006). Using Multivariate Analysis (4th ed). Allyn & Bacon. New York.

Tam, V. T., De Smedt, F., Batelaan O., Dassargues A.. 2004. Study on the Relationship between Lineaments and Borehole Specific Capacity in A Fractured and Karstified Limestone Area in Vietnam. Hydrogeology Journal 12. pp 662–673. DOI 10.1007/s10040-004-0329-1.

Thyne, G.G. 2004. Sequential Analysis of Hydrochemical Data for Watershed Characterization. Ground Water. 42 (5). p. 711. 13.

Todd, D.K. 1984. Groundwater Hydrology. John Wiley and Sons.

Turkandi. 1992. Peta Geologi Lembar Jakarta. Skala 1:100.000. Bandung: Puslitbang Geologi.

Van Bemmelen. 1949. The Geology of Indonesia. The Hague: Government Printing Office. v 1. 732 p.

Walsh, P. 2008. A new method for analyzing the effects of joints and stratigraphy on spring locations: a case study from the Sacramento Mountains, south central New Mexico, USA. Hydrogeology Journal. DOI 10.1007/s10040-008-0320-3.

Wulder, M. Dept. of Natural Resources Canada. Retrieved March Monday. 2008. from A Practical Guide to the Use of Selected Multivariate Statistics:http://www.pfc.cfs.nrcan.gc.ca/profiles/wulder/mvstats/intro_to_ms_e.html

Zhang, Y.K, and Bai, E.W. 1996. Simulation of Spring Discharge from a Limestone Aquifer in Iowa. USA. 4 (4).

BIODATA PENULIS

Penulis, Dasapta Erwin Irawan (NIM 32005002), lahir di Surabaya 17 April 1976. Pendidikan dasar di SDN Kertajaya XII, SMPN 12, dan SMAN 2, seluruhnya di Surabaya. Pada tahun 1994, penulis hijrah ke Kota Bandung dalam rangka menempuh pendidikan tinggi di Program Studi Teknik Geologi ITB pada tahun 1994. Pendidikan sarjana tersebut diselesaikan dalam waktu 4 tahun. Untuk tahap lanjut dari pendidikannya, penulis mengikuti pendidikan master di Program Magister Teknik Geologi pada tahun 1999, dilanjutkan dengan pendidikan doktor di Teknik Geologi ITB mulai tahun 2005 hingga 2008.

Minat penulis di bidang hidrogeologi kawasan gunung api tercermin sejak dari tugas akhir program sarjana dan magisternya yang mengambil contoh kasus Kawasan Bandung Selatan dan G. Ciremai. Bidang peminatan tersebut terus dikembangkan oleh penulis dalam bentuk berbagai publikasi pada jurnal nasional, pertemuan nasional, dan internasional sejak tahun 2000. Upaya untuk dapat menulis di jurnal internasional telah dimulai sejak tahun 2005. Saat ini sudah ada 2 publikasi, khususnya yang berkait dengan riset S3, yang telah memasuki proses review ke-2 di *Hydrogeology Journal* dan *Journal of Hydrology*.

Pengalaman kerja di ITB, penulis mengawalinya sebagai asisten Laboratorium Hidrogeologi sejak tahun 1999, Asisten Akademik di Kelompok Keilmuan Geologi Terapan pada tahun 2005 – 2007 serta CPNS mulai Desember 2007. Selain menangani kegiatan kuliah, praktikum, dan penelitian, penulis ikut berpartisipasi dalam berbagai tugas di tingkat program studi, fakultas, dan pusat.

Penulis menikah dengan Subkhi Dwipa Mahargyani pada tanggal 30 Januari 2005. Kemudian pada tanggal 2 Maret 2007, lahir putranya yang bernama Abraary Raditya Irawan.