

KAJIAN HUBUNGAN KARAKTERISTIK GEOMORFOLOGI DAN BAWAH PERMUKAAN (SUBSURFACE) STUDI KASUS DI DATARAN RENDAH BANTUL YOGYAKARTA INDONESIA

Dwi Wahyuni Nurwihastuti¹, Junun Sartohadi², Djati Mardiatno², Udo Nehren³

¹Jurusan Pendidikan Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Medan, Sumatera Utara, E-mail: nurwihastuti@gmail.com, ²Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, ³Institute for Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics, Cologne University of Applied Sciences, Cologne, Germany

Diterima 7 Januari 2013, disetujui untuk publikasi 22 Februari 2013

Abstract Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis karakteristik geomorfologi dan satuan-satuan bentuklahan di daerah penelitian, (2) menganalisis karakteristik bawah permukaan (subsurface) di daerah penelitian, dan (3) mengkaji hubungan antara karakteristik geomorfologi dengan karakteristik bawah permukaan (subsurface) di daerah penelitian. Kajian karakteristik geomorfologi dan satuan-satuan bentuklahan di daerah penelitian dilakukan berdasarkan interpretasi citra satelit multi resolusi, interpretasi peta RBI, dan survei lapangan. Berbagai teknik penajaman citra diterapkan untuk memperjelas kenampakan geomorfologikal pada citra satelit. Delineasi satuan bentuklahan dilakukan secara on-screen dengan menggunakan Sistem Informasi Geografi (SIG). Proses penghalusan delineasi satuan bentuklahan dilakukan dengan mempertimbangkan analisis pola kelurusan, pola aliran, dan pola penggunaan lahan yang ada pada citra satelit dan analisis pola kontur pada peta RBI digital. Informasi mengenai materi penyusun bentuklahan beserta struktur geologi yang menyertainya diperoleh dari pembacaan peta geologi. Kajian karakteristik bawah permukaan (subsurface) dilakukan dengan analisis geofisika, analisis data bor dan survei lapangan. Analisis hasil penelitian dilakukan secara deskriptif dan secara spasial atas obyek yang diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa morfologi daerah Bantul dapat diklasifikasikan sebagai dataran, perbukitan, dan pegunungan. Bentuklahan secara umum di Bantul terdiri dari 6 bentuklahan berdasarkan genesisnya, yaitu: fluviial, marine, aeolian, solusional, denudasional, dan struktural. Selain itu, struktur bawah permukaan dataran rendah Bantul berupa asimetris graben. Kedalaman basemen graben bervariasi hingga 1,6 km. Kedalaman sedimen bervariasi antara 3 – 150 m. Sedimen alluvium tebal yang tidak terkonsolidasikan menempati bagian timur dataran aluvial yang dekat gawir dan Pegunungan Baturagung. Sedimen alluvium dangkal yang tidak terkonsolidasikan menempati bagian bagian barat dataran aluvial dekat bukit sisa dan perbukitan denudasional. Kedalaman muka airtanah dangkal menempati bentuklahan fluviial, marine, dan aeolian. Sebaliknya, Kedalaman muka airtanah dalam menempati bentuklahan denudasional, struktural, dan solusional. Selain itu, bentuklahan fluviial, marine, dan aeolian memiliki nilai kerapatan (densitas) batuan rendah, yang menunjukkan material penyusun tebal yang tidak terkonsolidasikan berupa alluvium Kuartar..

Pendahuluan

karakteristik bawah permukaan (subsurface) sebagai sumberdaya alam merupakan hal menarik terkait dengan potensi bencana alam khususnya di Indonesia. Kepulauan Indonesia sebagai jalur hasil tumbukan tiga lempeng litosfer, yaitu: (1) lempeng Indo-Australia, yang bergeser ke utara, (2) lempeng Pasifik yang bergeser ke barat dan (3) lempeng Eurasia yang bergeser relatif ke selatan

(Verstappen, 2000). Berdasarkan pengukuran Very-long Baseline Interferometry, VLBI (Pratt, 2001 dalam Paripurno, 2006) diketahui bahwa saat ini lempeng samudera Indo-Australia, yang bergeser ke barat-laut dengan kecepatan rata-rata 5,5 – 7 cm/tahun, lempeng samudera Pasifik yang bergeser ke barat-laut dengan kecepatan rata-rata lebih dari 7 cm/tahun dan lempeng Eurasia yang bergeser ke arah barat daya dengan kecepatan rata-rata 2,6 sampai

Kata kunci:
geomorfologi,
bentuklahan, bawah
permukaan
(subsurface), Bantul

4,1 cm/tahun. Pergeseran lempeng litosfer ini merupakan faktor penyebab terjadinya gempa bumi. Hal ini mempengaruhi kondisi geomorfologi wilayah Indonesia yang kompleks dan dinamis, termasuk wilayah dataran rendah Bantul.

Obyek kajian geomorfologi adalah bentuklahan yang tersusun pada permukaan bumi di daratan maupun penyusun muka bumi di dasar laut, yang dipelajari dengan menekankan pada proses pembentukan dan perkembangan pada masa yang akan datang, serta konteksnya dengan lingkungan (Verstappen, 1983). Ada empat aspek bentuklahan yang dipelajari dalam geomorfologi yaitu: morfologi, morfostruktur yang mencakup di dalamnya morfogenetik dan morfodinamik, morfokronologi dan *morphoarrangement*.

Obyek kajian bawah permukaan (*subsurface*) adalah semua lapisan bawah permukaan sampai pada basemen, termasuk karakteristik airtanahnya (*groundwater*). Berdasarkan tipe dan ukuran material batuan dan sedimen penyusun lapisan bawah permukaan dapat diinterpretasikan proses-proses alam yang pernah terjadi dan sejarah pengendapannya. Karakteristik bawah permukaan merekam semua proses yang terjadi di masa lalu. Dengan demikian karakteristik bawah permukaan dapat digunakan untuk merekonstruksi karakteristik geomorfologi di masa lalu (*paleogeomorfologi*).

Kajian paleogeomorfologi merupakan kajian geomorfologi di masa lampau. Pengkajian paleogeomorfologi pada suatu daerah harus mengacu pada kondisi geomorfologi saat ini. Hal ini sesuai dengan konsep geomorfologi yang dikemukakan oleh Thornbury (1954) yaitu: "*Proses geomorfik yang bekerja pada masa geologi juga bekerja pada masa sekarang, walaupun tidak selalu dengan intensitas yang sama*" dan "*walaupun geomorfologi menekankan terutama pada bentanglahan sekarang, namun untuk mempelajarinya secara maksimal perlu mempelajari sejarah perkembangannya*". Konsep ini juga sangat penting untuk

merekonstruksi karakteristik geomorfologi di masa mendatang sebagai bahan kajian untuk pengelolaan wilayah di masa mendatang.

Karakteristik geomorfologi dan bawah permukaan (*subsurface*) yang dimiliki suatu daerah merupakan sumberdaya alam. Salah satu bagian dari sumberdaya alam adalah sumberdaya lahan. Pemanfaatan sumberdaya lahan yang seoptimal mungkin menjadi suatu keharusan agar mendapat hasil yang optimal dan lestari. Data mengenai sumberdaya lahan sangat diperlukan untuk dapat memanfaatkan potensi sumberdaya lahan secara optimal.

Studi kasus penelitian ini berlokasi di Kabupaten Bantul yang merupakan salah satu dari lima daerah kabupaten/kota di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Apabila dilihat bentang alamnya secara makro, wilayah Kabupaten Bantul terdiri dari daerah dataran yang terletak pada bagian tengah dan daerah perbukitan yang terletak pada bagian timur dan barat, serta kawasan pantai di sebelah selatan. Kondisi bentang alam tersebut relatif membujur dari utara ke selatan. Penelitian ini dibatasi pada dataran rendah Bantul, yaitu seluruh dataran yang berada di wilayah Kabupaten Bantul. Walaupun seluruh daerah penelitian berupa dataran rendah, namun pernah mengalami kerusakan yang sangat bervariasi akibat gempabumi tanggal 27 Mei 2006. Hal ini sangat menarik untuk diteliti mengenai kajian geomorfologi dengan memfokuskan pada kajian satuan-satuan bentuklahan dan karakteristik bawah permukaan.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis karakteristik geomorfologi dan satuan-satuan bentuklahan di daerah penelitian, (2) menganalisis karakteristik bawah permukaan (*subsurface*) di daerah penelitian, dan (3) mengkaji hubungan antara karakteristik geomorfologi dengan karakteristik bawah permukaan (*subsurface*) di daerah penelitian.

Metode Penelitian

Kajian karakteristik geomorfologi dan satuan-satuan bentuklahan di daerah penelitian dilakukan berdasarkan interpretasi citra satelit multi resolusi, interpretasi peta RBI, dan survei lapangan. Berbagai teknik penajaman citra diterapkan untuk memperjelas kenampakan geomorfologikal pada citra satelit. Delineasi satuan bentuklahan dilakukan secara *on-screen* dengan menggunakan Sistem Informasi Geografi (SIG). Proses penghalusan delineasi satuan bentuklahan dilakukan dengan mempertimbangkan analisis pola kelurusan, pola aliran, dan pola penggunaan lahan yang ada pada citra satelit dan analisis pola kontur pada peta RBI digital. Informasi mengenai materi penyusun bentuklahan beserta struktur geologi yang menyertainya diperoleh dari pembacaan peta geologi. Kajian karakteristik bawah permukaan (*subsurface*) dilakukan dengan analisis geofisika, analisis data bor dan survei lapangan. Analisis hasil penelitian dilakukan secara deskriptif dan secara spasial atas obyek yang diteliti.

Hasil Dan Pembahasan

Karakteristik Geomorfologi Bantul

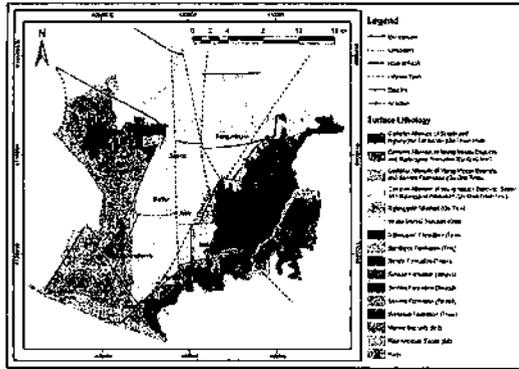
Aspek-aspek geomorfologi terdiri dari morfologi, morfogenesis, morfokronologi, dan morfoarransem (Van Zuidam, 1985). Morfologi mendiskripsikan relief secara umum suatu daerah. Morfologi terdiri dari morfografi dan morfometri (Joyosuharto, 1986 dalam Sartohadi, 2001). Morfografi adalah aspek deskriptif dari karakteristik geomorfologi suatu daerah, seperti dataran, perbukitan, pegunungan, dan plato. Sedangkan, morfometri adalah aspek kuantitatif seperti kemiringan lereng dan ketinggian. Selanjutnya, aspek morfologi menjadi sangat penting diantara aspek-aspek geomorfologi lainnya karena manusia berkesan pada suatu bentuk tertentu pada permukaan bumi (Sartohadi, 2001).

digital elevation models (DEM) dari SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mapping Mission*). SRTM sangat berguna untuk daerah yang luas (Bishop et al., 2012), seperti daerah Bantul. Elevasi Bantul dari 0 m sampai 507 m di atas permukaan air laut. Titik terendah berlokasi di sepanjang pantai Bantul. Sedangkan titik tertinggi berlokasi di Pegunungan Baturagung Range, yaitu di Sudimoro, Desa Mangunan, Kecamatan Dlingo.

Morfologi daerah Bantul dapat diklasifikasikan sebagai dataran, perbukitan, dan pegunungan. Daerah dataran berlokasi di bagian tengah Bantul, yang berasosiasi dengan dua aliran sungai utama yaitu Sungai Progo dan Opak. Daerah perbukitan yang berlokasi di bagian barat Bantul adalah Perbukitan Sentolo. Sedangkan perbukitan dan pegunungan berlokasi di sebelah timur dan selatan Bantul yaitu di Pegunungan Baturagung dan Sewu.

Proses pembentukan bentuklahan berkaitan dengan genesis atau morfogenesis. Genesis berasal dari kata Yunani yang berarti asal mula dan dalam istilah geomorfologi berkaitan dengan asal mula bentuklahan, dengan kata lain proses yang bertanggungjawab terhadap penciptaan bentuk (Gustavsson, 2005). Dengan demikian, morfogenesis adalah aspek geomorfologi yang berhubungan dengan asal dan perkembangan bentuklahan.

Morfogenesis dapat dirinci lagi menjadi morfostruktur pasif, morfostruktur aktif, dan morfodinamik. Morfostruktur pasif berkaitan dengan lithologi, baik jenis batuan maupun strukturnya. Sedangkan morfostruktur aktif berkaitan dengan dinamika proses endogen yang terdiri dari kejadian-kejadian tektonik selama pembentukan suatu bentuklahan. Morfostruktur pasif yang terdapat di Bantul berupa patahan, kelurusan, gawir sesar dan antiklin. Morfostruktur pasif dan aktif di Bantul disajikan dalam bentuk peta lithologi permukaan (*surface lithological map*), seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lithologi permukaan daerah Bantul

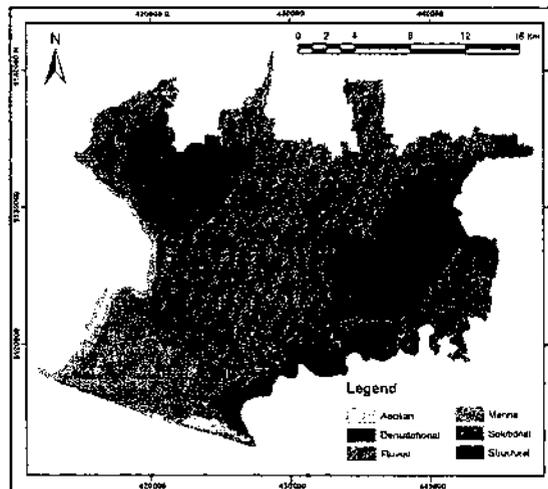
Aspek lithologi permukaan merupakan aspek penting dari bentuklahan. Hal ini terkait dengan perkembangan bentuklahan dan proses geomorfologi yang bekerja pada suatu daerah. Peta lithologi permukaan pada penelitian ini dibuat berdasarkan interpretasi visual dari citra ASTER RGB 3,4, PCA56789 (Nurwihastuti, 2008); peta geologi lembar Yogyakarta oleh Rahardjo et al. (1995); dan peta geologi oleh McDonald and Partners (1984).

Morfodinamik berkaitan dengan dinamika eksogen. Morfodinamik Bantul disebabkan oleh air dan angin, yaitu gerakan massa termasuk erosi tanah, sedimentasi yang disebabkan oleh air dan deposit pasir yang disebabkan oleh angin. Gerakan massa termasuk erosi tanah terjadi di daerah perbukitan dan pegunungan di Bantul. Sedimentasi terjadi di sepanjang sungai di Bantul, terutama sungai utama, yaitu Sungai Progo dan Sungai Opak. Deposit pasir yang disebabkan oleh angin terjadi di sepanjang pesisir Bantul.

Morfokronologi mendeskripsikan umur absolut dan relatif dari bentuklahan dan proses yang terkait. Morfokronologi di daerah Bantul dianalisis dengan merujuk umur relatif bentuklahan dan proses yang terkait, contohnya beting gisik muda dan beting gisik tua. Beting gisik muda terbentuk setelah beting gisik tua. Bentuklahan yang berlokasi dekat dengan pantai merupakan bentuklahan yang lebih muda karena terkena proses aktif gelombang di pantai. Selanjutnya,

bentuklahan yang berlokasi dekat dengan sungai juga lebih muda karena terkena proses aktif dari aliran sungai. Morfokronologi juga mendeskripsikan genesis setiap bentuklahan.

Morfoarransemenn mendeskripsikan aspek keruangan dan hubungan antar berbagai bentuklahan dan prosesnya. Daerah perbukitan dan pegunungan dapat dibagi menjadi puncak, lereng atas, lereng tengah, lereng bawah, dan dataran lereng kaki berdasarkan morfoarransemennya. Dataran aluvial juga dapat dibedakan menjadi tanggul alam dan dataran banjir berdasarkan morfoarransemennya. Tanggul alam berlokasi sepanjang sungai dan reliefnya lebih tinggi dibanding daerah sekitarnya. Dataran banjir berlokasi di belakang tanggul alam dengan relief yang lebih rendah dibanding daerah sekitarnya. Selanjutnya bentuklahan di Bantul secara umum terdiri dari 6 bentuklahan berdasarkan genesisnya, yaitu: fluvial, marine, aeolian, solusional, denudasional, dan struktural seperti disajikan pada Gambar 2, serta secara detail terdapat 48 bentuklahan.



Gambar 2. Bentuklahan secara umum berdasarkan genesisnya di Bantul

Karakteristik Bawah Permukaan Bantul Lithologi, Stratigrafi dan Struktur Geologi Bantul

Lithologi di Bantul secara stratigrafi dari tua sampai muda terdiri dari Formasi Semilir

(Tmse), Formasi Nglanggran (Tmn), Formasi Sambipitu (Tms), Formasi Sentolo (Tmps), Formasi Wonosari (Tmwl) dan deposit Kuartar. Deposit Kuartar terdiri dari Deposit Vulkanik Muda dari Gunung Merapi (Qmi), Alluvium Nglanggran (Qa-Tmn), Kompleks Alluvium dari Deposit Merapi Muda dan Formasi Nglanggran (Qa-Qmi-Tmn), Kompleks Alluvium dari Deposit Merapi Muda, Formasi Semilir, dan Formasi Nglanggran (Qa-Qmi-Tmse-Tmn), Kompleks Alluvium dari Formasi Semilir dan Formasi Nglanggran (Qa-Tmse-Tmn), Kompleks Alluvium dari Deposit Merapi Muda dan Formasi Sentolo (Qa-Qmi-Tmps), Fine Andesite Sands (Sd), Deposit Marine (Md).

Secara umum Bantul terdiri dari dua lithologi yang sangat berbeda yaitu deposit Kuartar dan batuan Tersier. Deposit Kuartar terdiri dari deposit pasir sebagai hasil produk dari vulkanik Merapi dan deposit lempung sebagai hasil dari pelapukan batuan Tersier. Sedangkan batuan Tersier terdiri dari batuan beku Tersier dan batuan sedimen Tersier. Selanjutnya, batuan beku Tersier terdiri dari Formasi Semilir, Formasi Nglanggran, dan Formasi Sambipitu. Sedangkan batuan sedimen Tersier terdiri dari Formasi Wonosari dan Formasi Sentolo.

Formasi Semilir terdiri dari tuff-breksi, breksi pumice, tuff dasit, tuff andesit, *tuffaceous claystone* dari Oligosen awal – Miosen akhir. Formasi Nglanggran terdiri dari breksi vulkanik, breksi flow, anglomerat, lava dan tuff dari Miosin akhir. Selanjutnya, Smyth et al. (2005; 2008) menyebutkan bahwa bagian Formasi Semilir dan Nglanggran terbentuk dari *sequence volcanic* dan batuan vulkanik klastik yang meletus di daerah yang luas. Batuan ini terendapkan dalam periode yang sangat pendek, sekitar satu juta tahun untuk pembentukan batuan. Selanjutnya, Smyth et al. (2008) menyebutkan bahwa erupsi Semilir terjadi pada Miosen akhir.

Formasi Sambipitu terdiri dari tuff, shale, siltstone, sandstone dan konglomerat dari Miosen Tengah. Formasi Wonosari terdiri dari batugamping coral reef, calcarenite dan

tuffaceous calcarenite Miosen Atas – Pliosen Atas. Formasi Sentolo terdiri dari batugamping dan *marly sandstone* dari Miosen Atas – Pliosen Atas, yang menyebar sepanjang perbukitan di sekitar Sungai Progo. McDonald and Partners (1984) membagi Formasi Sentolo menjadi 3 jenis, yaitu: Sentolo-1, Sentolo-2, dan Sentolo-3. Sentolo-1 terdiri dari *marls*, *tuffs*, dan *conglomerates*. Sentolo-2 terdiri dari *marly limestones* dan calcarenites. Sentolo-3 terdiri dari *bedded limestones*.

Struktur geologi daerah Bantul dan sekitarnya sangat dipengaruhi oleh pergerakan lempeng tektonik antara lempeng Eurasia dan lempeng Hindia-Australia. Bantul merupakan bagian dari Basin Yogyakarta. Struktur geologi Basin Yogyakarta adalah graben, yang dipisahkan oleh dua patahan, patahan Sungai Progo di sebelah barat dan patahan Sungai Opak yang berbatasan dengan Pegunungan Selatan di sebelah timur. Patahan ini diinterpretasi dari pola gravitasi (Untung et al., 1973). Basin Yogyakarta sebagian besar berupa sedimen Merapi Muda yang terdiri dari *tuff*, *volcanic ash*, *breccias*, *agglomerate* dan *lava* yang berumur Kuartar (Bemmelen, 1970). Ketebalan sedimennya mencapai 100 m (Hendrayana, 1993 dalam Pramumijoyo dan Sudarno, 2008). Sedimen lainnya berasal dari sedimen sungai dan laut. Sedimen sungai dan laut terdiri dari *gravel*, *sand*, *silt* dan *clay* yang berumur Holosen (Rahardjo et al., 1995). Sistem patahan di daerah ini telah diinterpretasi sebagai patahan tertimbun (McDonald and Partners, 1984; Rahardjo et al., 1995).

Proses Paleo-Sedimentasi di Bantul

Paleo-sedimentasi adalah proses sedimentasi yang terjadi di masa lampau. Paleo-sedimentasi di dataran rendah Bantul dapat diidentifikasi berdasarkan material hasil sedimentasi. Material hasil sedimentasi berisi informasi tentang lingkungan permukaan bumi di masa lampau. material hasil sedimentasi dapat diidentifikasi berdasarkan data geolistrik dan data bor.

Data geolistrik menyajikan nilai *resistivity* dari material penyusun daerah Bantul. Berdasarkan nilai *resistivity*, dapat diketahui jenis material penyusun daerah Bantul. Peta geologi digunakan untuk mendukung interpretasi data geolistrik.

Berdasarkan analisis geolistrik, dapat diketahui jenis material penyusun dataran rendah Bantul terdiri dari alluvium. Hal ini membuktikan bahwa telah terjadi proses fluvial di daerah ini. Proses fluvial terdiri dari proses transportasi dan sedimentasi. Ketebalan alluvium mencapai 150 m berdasarkan analisis geolistrik. Tebalnya alluvium mengindikasikan bahwa proses sedimentasi terjadi berulang-ulang. Hasil analisis geolistrik diverifikasi dengan hasil analisis data bor.

Data bor di dataran rendah Bantul terdapat 52 titik, dengan kedalaman yang bervariasi dari 20 m sampai 150 m. Secara umum komposisi sedimen dari *unconsolidated material* berasal dari Gunungapi Merapi. Sedimen itu terdiri dari pasir, gravel, lempung, dan debu. Di beberapa titik data bor, terdapat lapisan breksi. Hal tersebut membuktikan bahwa material berasal dari proses fluvial. Proses fluvial ini dicirikan oleh perulangan pasir yang dominan dengan ukuran butir dari halus ke kasar: debu, lempung, di beberapa tempat terdapat campuran pasir-gravel dan breksi. Perulangan lapisan seperti ini menunjukkan bahwa daerah tersebut mengalami proses sedimentasi yang berulang-ulang.

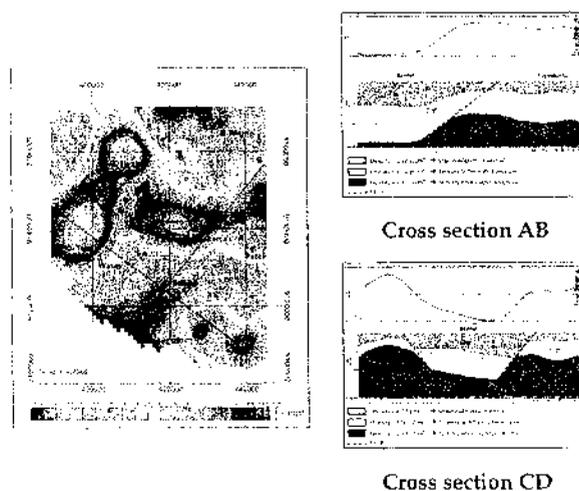
Skematik Pola Past Relief di Bantul

Past relief menunjukkan relief di suatu daerah pada masa lampau. Past relief dicerminkan oleh basemen dataran rendah Bantul yang terdiri dari material Tersier. Basemen dataran rendah Bantul dianalisis menggunakan informasi gravitasi yang digunakan untuk memprediksikan struktur geologi dan densitas batuan penyusun kerak bumi. Menurut Widijono dan Subagio (2009), distribusi anomali gravitasi memegang peranan penting untuk menentukan distribusi batuan dan struktur geologi di bawah

permukaan yang berisi sedimen Kuartar. Widijono dan Subagio (2009) juga menyatakan bahwa kelurusan anomali Bouguer merupakan respon gravitasi dari struktur kelurusan (*lineament*) suatu daerah. Lebih lanjut, berdasarkan peta kontur gravitasi dapat diinterpretasi kedalaman basemen (Widijono and Subagio, 2009; Barros and Assumpcao, 2011). Tinggi dan rendahnya anomali Bouguer dapat diinterpretasi sebagai tinggi dan rendahnya basemen (Barros and Assumpcao, 2011).

Analisis gravitasi menggunakan peta anomali Bouguer lembar Yogyakarta oleh Marzuki dan Otong (1991) yang dipublikasikan oleh Pusat Penelitian Geologi, Direktorat Geologi dan Sumberdaya Mineral, Departmen Pertambangan dan Energi. Peta anomali Bouguer merupakan peta anomali gravitasi yang mencerminkan pola persebaran densitas batuan.

Peta anomali Bouguer dianalisis untuk memperoleh peta anomali lokal atau residu. Analisis ini dilakukan di daerah Yogyakarta, Bantul, dan sekitarnya. Nilai anomali gravitasi lokal di daerah Yogyakarta, Bantul, dan sekitarnya bervariasi dari -12.9 mGal sampai +15.9 mGal seperti disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta anomali lokal atau residu daerah Yogyakarta, Bantul, dan sekitarnya

Nilai anomali gravitasi lokal diinterpretasi untuk mengetahui struktur bawah permukaan (*subsurface structure*). Perbedaan mencolok dalam nilai anomali gayaberasat lokal dan

kelurusan anomali gravitasi lokal mencerminkan patahan di daerah itu. Nilai negatif dari anomali gravitasi lokal menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki kepadatan batuan rendah. Rendahnya densitas batuan menunjukkan bahwa daerah tersebut terdiri dari materi yang tidak terkonsolidasi. Di sisi lain, nilai positif anomali gravitasi lokal menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki densitas batuan tinggi. Semakin tinggi densitas batuan menunjukkan bahwa daerah tersebut terdiri dari sedimen Tersier dan batuan Tersier.

Ada 3 jenis batuan berdasarkan kepadatan batu di Yogyakarta, Bantul dan daerah sekitarnya, yaitu materi yang tidak terkonsolidasi, sedimen Tersier (batu gamping) dan batuan Tersier (batuan beku). Kepadatan batu bahan yang tidak terkonsolidasi adalah 2,0-2,27 g/cm³. Kepadatan batuan sedimen Tersier (batu gamping) adalah 2,5 g/cm³. Kepadatan batuan Tersier (batuan beku) adalah 2,73-2,80 g/cm³. Berdasarkan pemodelan bawah permukaan, hasilnya menunjukkan bahwa ada patahan tertimbun antara Yogyakarta dan Bantul dan ada struktur graben di daerah Bantul.

Berdasarkan pada penampang melintang (*cross section*) dari pemodelan bawah permukaan di beberapa bagian dari dataran rendah Bantul, dapat diinterpretasikan bahwa struktur geologi dari Bantul adalah asimetri graben. Bagian timur graben lebih dalam dari bagian barat graben. Kedalaman basemen graben bervariasi hingga 1,6 km. Hasil ini konsisten dengan penelitian dari Fukuoka et al. (2008), Setijadji et al. (2008) dan Daryono (2011). Dataran rendah Bantul adalah bagian dari Basin Yogyakarta. Fukuoka et al. (2008) telah menggambarkan struktur kerapatan dari Basins Yogyakarta. Hasilnya menunjukkan bahwa lebar Basins Yogyakarta 30 – 40 km dan struktur grabennya lebih dari 2 km. Menurut Setijadji et al. (2008), Basins Yogyakarta mempunyai struktur setengah-graben yang lebih dalam pada margin timurnya. Selain itu, Daryono (2011) menyatakan bahwa frekuensi

resonansi data pengukuran microtremor dapat menggambarkan profil kedalaman graben secara kualitatif, sehingga diketahui bahwa graben Bantul bukan tipe graben simetris dengan batuan dasar yang lebih mendalam di bagian timur.

Pola relief masa lalu di dataran rendah Bantul sekarang ditutupi oleh bahan sedimen. Kedalaman sedimen di dataran rendah Bantul dapat diidentifikasi dari data bor dan data geolistrik. Berdasarkan analisis data bor dan data geolistrik, dapat disimpulkan sedimen di daerah Bantul bervariasi dari 3 m hingga 150 m. Sedimen terdalam terdapat di bagian timur dari dataran rendah Bantul. Sedimen lebih dalam di dekat lereng Pegunungan Baturagung. Sementara sedimen dangkal dekat perbukitan Sentolo dan bukit sisa Sentolo. Fakta ini menunjukkan bahwa basemen dataran rendah Bantul tidak datar tapi miring dan tidak teratur. Semakin dalam basemen terdapat di bagian timur. Sedangkan basemen dangkal terdapat di bagian barat.

Karakteristik Airtanah di Bantul

Karakteristik airtanah yang diamati di Bantul memiliki hubungan dekat dengan gempa, yaitu ketinggian muka airtanah. Ketinggian muka airtanah di Bantul bervariasi 0,34 – 24,34 m. Gempabumi dapat mengakibatkan perubahan debit mataair, munculnya mataair baru, perubahan mendadak tinggi muka air (Todd dan Mays, 2005). Biagi, et al. (2000) menunjukkan bahwa gempa juga dapat mempengaruhi hidrogeokimia air tanah. Debit mataair dan muka air sungai juga terpengaruh oleh gempa (Carro et al., 2005). Anomali permukaan air danau juga berubah karena gempa khususnya di dekat garis patahan (Utkucu, 2006). Kedalaman muka airtanah juga mengalami perubahan akibat gempa (Chia et al, 2008; Ramana et al, 2007). Selain itu, efek yang paling terkenal dari gempa bumi yang berkaitan dengan airtanah adalah likuifaksi.

Likuifaksi terjadi di beberapa tempat di Bantul saat gempa 2006. Likuifaksi ini diindikasikan dengan munculnya retakan

permukaan yang berasosiasi dengan pasir halus. Saksi mata menyebutkan bahwa ada air dan pasir menyembur berasal dari retakan saat gempa di sawah. Pasir juga menyembur dari salah satu sumur di dekat sawah. Pasir berasal dari deposit Gunungapi Merapi Muda (Qmi) yang berusia Holosen. Selain itu, muka airtanah di lokasi ini dangkal. Akibatnya, lingkungan geologi dan hidrologi di lokasi ini mendukung terjadinya likuifaksi ketika gempa terjadi.

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian mengenai likuifaksi selama gempabumi tahun 2006 di Bantul. Menurut Natawijaya (2007), likuifaksi terjadi di Kecamatan Bantul, Jetis, Imogiri, Pleret, Piyungan dan Banguntapan. Jejak peristiwa likuifaksi di daerah Bantul ditunjukkan oleh lapisan material pasir halus sampai kasar di daerah aluvial Kuartar (Soebowo et al., 2007). Selain itu, Soebowo et al. (2009) menyatakan bahwa lapisan tanah yang gembur terdiri dari pasir berlumpur dan lumpur berpasir di kedalaman antara 0,2 – 12,8 m berpotensi dicairkan selama gempa bumi. Ketebalan lapisan tanah cair bervariasi antara 0,2 m dan 5,2 m. Sementara itu, penurunan lapisan tanah bervariasi antara 0,21 cm dan 12,98 cm yang terkonsentrasi di bagian tengah wilayah Sesar Opak. Selain itu, umumnya likuifaksi menyebar di sekitar sungai Opak, terutama di zona indeks kerentanan gempa tinggi (Daryono, 2011).

Ada hubungan antara likuifaksi dan bentuklahan. Menurut Martin et al. (1999), likuifaksi dapat terjadi di daerah pesisir, teluk, muara, dataran banjir sungai dan cekungan, daerah sekitar danau dan waduk, dan gumuk pasir. Hal ini dapat disimpulkan bahwa likuifaksi dapat terjadi di bentuklahan marin, bentuklahan fluvial dan bentuklahan aeolian. Namun, lokasi kejadian likuifaksi karena gempa Bantul 2006 hanya menempati bentuklahan fluvial. Daerah ini terdiri dari materi yang tidak terkonsolidasi dari deposit Gunung Merapi Muda (Qmi) berumur Holosen. Selain itu, muka airtanah di bentuklahan fluvial dangkal.

Selain likuifaksi, banyak sumur gali yang kering atau air menjadi kotor di beberapa tempat setelah terjadi gempa bumi tahun 2006. Saksi mata menyebutkan bahwa ada sumur kering dan pasir di sumur. Para saksi mata lain menyebutkan bahwa pada saat gempa terjadi di beberapa tempat air menyembur. Tapi setelah gempa mereda banyak sumur kering, dan mata air juga menjadi kering. Fenomena ini dapat terjadi karena ada retak yang membuat air tanah dangkal masuk ke dalam lapisan di bawahnya. Kejadian ini mulai pada musim kemarau sehingga hujan tidak turun lagi. Selain itu, Anderson dan Marliyani (2008) berhipotesis bahwa kondisi ini disebabkan oleh perubahan lokal pada elevasi muka air dan terjadi mobilisasi pasir jenuh selama tanah bergetar. Namun, setelah musim hujan, sumur kering terisi dengan air lagi.

Hubungan antara Karakteristik Geomorfologi dengan Karakteristik Bawah Permukaan (Subsurface) di Bantul

Korelasi spasial antara karakteristik geomorfologi dan bawah permukaan dibagi menjadi korelasi spasial antara: aspek geomorfologi dan kedalaman basemen, aspek geomorfologi dan ketebalan sedimen, aspek geomorfologi dan jenis material, aspek geomorfologi dan kedalaman muka airtanah, bentuklahan dan basemen, bentuklahan dan ketebalan sedimen, bentuklahan dan jenis material, bentuklahan dan kedalaman muka airtanah. Hasil korelasi spasial antara karakteristik geomorfologi dan bawah permukaan digambarkan sebagai berikut:

1. Daerah dataran memiliki basemen yang lebih dalam. Berbeda dengan daerah dataran, bukit dan daerah pegunungan memiliki basemen dangkal. Deposit vulkanik muda Gunungapi Merapi (Qmi) dan sedimen Kuartar lainnya menempati daerah basemen yang lebih dalam. Di sisi lain, batuan Tersier menempati daerah basemen dangkal.
2. Daerah dataran terdiri dari sedimen tebal. Berdasarkan analisis statistik korelasi Spearman, koefisien korelasi antara

morfologi dan ketebalan sedimen adalah -0,704 (korelasi yang kuat). Ini berarti morfologi semakin datar, sedimen semakin tebal.

3. Daerah deposit vulkanik muda Gunungapi Merapi (Qm₁) dan sedimen Kuartar lainnya memiliki sedimen tebal. Sebaliknya, daerah batuan Tersier memiliki sedimen tipis.
4. Material tidak terkonsolidasi menempati daerah dataran Bantul. Sedangkan material terkonsolidasi menempati bukit dan daerah pegunungan Bantul.
5. Material tidak terkonsolidasi terdiri dari batuan Kuartar. Sedangkan material konsolidasi terdiri dari batuan Tersier.
6. Kedalaman muka airtanah dangkal berlokasi di daerah dataran. Berdasarkan analisis statistik korelasi Spearman, koefisien korelasi antara morfologi dan kedalaman muka airtanah 0,751 (korelasi yang kuat). Ini berarti morfologi semakin datar, kedalaman muka airtanah semakin dangkal. Sebaliknya, semakin tinggi suatu daerah, kedalaman muka airtanah semakin dalam.
7. Daerah deposit vulkanik muda Gunungapi Merapi (Qm₁) dan sedimen Kuartar lainnya memiliki kedalaman muka airtanah dangkal. Di sisi lain, daerah batuan Tersier memiliki kedalaman muka airtanah yang lebih dalam.
8. Bentuklahan yang terdiri dari bahan batuan Tersier memiliki nilai gravitasi tinggi, yang terdiri dari bentuklahan denudasional, struktural, dan solusional. Selain itu, struktur tanah yang terdiri dari material endapan Kuartar memiliki nilai gravitasi rendah, yang terdiri dari bentuklahan fluvial, marin, dan aeolian.
9. Sedimen tebal menempati bentuklahan fluvial, marin, dan aeolian. Sebaliknya, sedimen yang lebih tipis menempati bentuklahan struktural, denudasional, dan solusional. Selain itu, sedimen tebal menempati bentuklahan fluvial.
10. Material tidak terkonsolidasi menempati bentuklahan fluvial, marin, dan aeolian. Berbeda dengan materi yang tidak terkonsolidasi, material konsolidasi

menempati bentuklahan denudasional, struktural, dan solusional.

11. Kedalaman muka airtanah dangkal menempati bentuklahan fluvial, marin, dan aeolian. Sebaliknya, kedalaman muka airtanah yang lebih dalam menempati bentuklahan struktural, denudasional, dan solusional.

Hasil korelasi spasial antara morfologi dan kedalaman muka airtanah sesuai dengan argumen Haldar et al. (2011) bahwa topografi menentukan daerah tangkapan air dan transmisi airtanah di suatu wilayah. Kedalaman muka airtanah dangkal berada pada daerah dataran sedangkan kedalaman muka airtanah dalam terjadi di lahan berbukit (Haldar et al., 2011). Selanjutnya, hasilnya menunjukkan bahwa ada korelasi spasial antara bentuklahan dan kedalaman muka airtanah. Menurut Haldar et al. (2011), bentuklahan menentukan daerah tangkapan air dan transmisi airtanah di suatu wilayah. Akibatnya, bentuklahan mempengaruhi kedalaman muka airtanah di suatu daerah.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang sudah dicapai dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pendekatan geomorfologi dapat digunakan untuk kajian karakteristik bawah permukaan (*subsurface*). Hal ini karena ada hubungan yang signifikan antara karakteristik geomorfologi dan karakteristik bawah permukaan (*subsurface*). Sedimen alluvium tebal yang tidak terkonsolidasikan menempati bagian timur dataran aluvial yang dekat gawir dan Pegunungan Baturagung. Sedimen alluvium dangkal yang tidak terkonsolidasikan menempati bagian bagian barat dataran aluvial dekat bukit sisa dan perbukitan denudasional. Kedalaman muka airtanah dangkal menempati bentuklahan fluvial, marine, dan aeolian. Sebaliknya, kedalaman muka airtanah dalam menempati bentuklahan denudasional, struktural, dan solusional. Selain itu, bentuklahan fluvial, marin, dan aeolian memiliki nilai kerapatan (densitas) batuan rendah, yang menunjukkan

material penyusun tebal yang tidak terkonsolidasikan berupa alluvium Kuartar.

Daftar Pustaka

- Anderson, R., and Marliyani, G.I., 2008, Comparison – Contrast Notes for the 2006 Yogyakarta and the 1906 San Francisco Earthquakes, In Karnawati, D., Pramumijoyo, S., Anderson, R., Husein, S. (Eds.) *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. Star Publisher, Los Angeles (IN PRESS).
- Barros, L.V., Assumpcao, M., 2011, Basement depths in the Parecis Basin (Amazon) with receiver functions from small local earthquakes in the Porto dos Gaúchos seismic zone, *Journal of South American Earth Sciences* 32 (2011) 142-151, Retrieved on 25 January 2013 from: http://www.iag.usp.br/~marcelo/pdfs/BarrosAssumpcao_Local_RF_ISAmES2011.pdf.
- Bemmelen, R.W. van, 1970, *The Geology of Indonesia 2nd Edition*, Martinus Nijhoff, The Hague, Netherlands.
- Biagi, P.F., Ermini, A., Cozzi, E., Khatkevich, Y.M., and Gordeev, E.I., 2000, Hydrogeochemical Precursors in Kamchatka (Russia) Related to the Strongest Earthquakes in 1988-1997, *Natural Hazards* 21: 263-276.
- Bishop, M. P., James, L.A., Shroder Jr., J.F., Walsh, S.J., 2012, Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research, *Geomorphology* 137 (2012) 5-26.
- Carro, M., de Amicis, M., and Luzi, L., 2005, Hydrogeological Changes Related to the Umbria-Marche Earthquake of 26 September 1997 (Central Italy), *Natural Hazards* 34: 315-339.
- Chia, Y., Chiu, J.J., Chiang, Y.H., Lee, T.P., and Liu, C.W., 2008, Spatial and Temporal of Groundwater Level Induced by Thrusting Faulting, *Pure. Appl. Geophys*; 165, 5-16.
- Daryono, 2011, Indeks Kerentanan Seismik berdasarkan Mikrotremor pada Setiap Satuan Bentuklahan di Zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta, *Disertasi*, Program Pascasarjana Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Fukuoka, K., Ehara, S., Fujimitsu, Y., Udi, H., Setyawan, A., Setijadji, L. D., Harijoko, A., Pramumijoyo, S., Setiadi, Y., Wahyudi, 2008, Interpretation of the 27 May 2006 Yogyakarta earthquake hypocenter and subsurface structure deduced from the aftershock and gravity data. In Karnawati, D., Pramumijoyo, S., Anderson, R., Husein, S. (Eds.) *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. Star Publisher, Los Angeles (IN PRESS).
- Gustavsson, M., 2005, Development of a Detailed Geomorphological Mapping System and GIS Geodatabase in Sweden, Chapters 1-4: Review of Geomorphological mapping, *Licentiate Thesis*, May 2005.
- Haldar, D., Sehgal, V.K., Kumar, G., Sarma, K.S.S., 2011, Evaluation of ground water and land resources in relation to landforms in Alwar District (Rajasthan): A remote sensing based approach, *ARCH. ENVIRON. SCI.* (2011), 5, 37-45, <http://aes.asia.edu.tw/Issues/AES2011/HaldarD2011.pdf>, Access on March 11, 2013.
- Martin, G.R., Lew, M., Arulmoli, K., Baez, J.I., Blake, T.F., Earnest, J., Gharib, F., Goldhammer, J., Hsu, D., Kupferman, S., O'Tousa, J., Real, C.R., Reeder, W., Simantob, E., Youd, T.L. 1999, *Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California*, Southern California Earthquake Center, University of Southern California.
- Marzuki and Otong, 1991, *Bouguer Anomaly Map of The Yogyakarta Quadrangle Java*, Geological Research and Development Centre, Directorate General Geology and Mineral Resources, Department of Mines Energy.
- McDonald & Partners, 1984, *Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study*, Volume 3: Groundwater: Government of The Republic Indonesia, Ministry of Public Works, Directorate General of Groundwater Resources Development Groundwater, Development Project (P2AT), pp9-19.
- Natawidjaja, D.H., 2007, Tectonic Setting Indonesia dan Pemodelan Sumber Gempabumi dan Tsunami, *Pelatihan Pemodelan Run-Up Tsunami*, RISTEK, 20-24 Agustus 2007.
- Nurwihastuti, D.W., 2008, Integrasi Pemrosesan Citra ASTER dan Sistem Informasi Geografis untuk Kajian Geomorfologi, Studi Kasus di Sebagian Daerah Istimewa Yogyakarta, *Thesis*, Program Pascasarjana Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Paripurno, E.T., 2006, *Perkembangan Geodinamika Indonesia dalam kaitannya dengan Geodinamika Regional*. www.geopangca.or.id.

- Pramumijoyo, S. and Sudarno, I., 2008, Surface Cracking due to Yogyakarta Earthquake 2006. In Karnawati, D., Pramumijoyo, S., Anderson, R., Husein, S. (Eds.) *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. Star Publisher, Los Angeles (IN PRESS).
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, and Rosidi, H.M.D., 1995, Geological Map of The Yogyakarta Sheet, Jawa, Scale 1:100.000, Geological Research and Development Centre, Bandung.
- Ramana, D.V., Chadha, R.K., Singh, Chandrani, and Shekar, M., 2007, Water Level Fluctuations due to Earthquakes in Koyna-Warna Region, India, *Nat Hazards* 40: 585-592.
- Sartohadi, J., 2001, Geomorphological Analysis for Soil Mapping Using Remote Sensing and Geographic Information Systems: A Case Study in Western Gunungkidul, Yogyakarta - Indonesia, *Dissertation*, Leopold-Franzens University of Innsbruck, Institute of Geography, Innsbruck - Austria.
- Setijadji, L. D., Watanabe, K., Barianto, D. H., Rahardjo, W., Sudarno, I., Susilo, A., Itaya, T., 2008, Searching for the Active Fault of the Yogyakarta Earthquake of 2006 Using Data Integration on Aftershocks, Cenozoic Geohistory, and Tectonic Geomorphology. In Karnawati, D., Pramumijoyo, S., Anderson, R., Husein, S. (Eds.) *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. Star Publisher, Los Angeles (IN PRESS).
- Smyth, H., Hall, R., Hamilton, J., and Kinny, P., 2005, East Java: Cenozoic Basins, Volcanoes and Ancient Basement, Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Thirtieth Annual Convention & Exhibition, August 2005.
- Smyth, H.R., Hall, R., and Nichols, G.J., 2008, Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: The stratigraphic record of eruptions on an active continental margin, in Draut, A.E., Clift, P.D., and Scholl, D.W., eds., *Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones: Geological Society of America Special Paper 436*, p. 199-222.
- Soebowo, E., Tohari, A., dan Sarah, D., 2007, Studi Potensi Likuefaksi di Daerah Zona Patahan Opak Patalan, Bantul, Jogjakarta, *Prosiding Seminar Geoteknologi Kontribusi Ilmu Kebumihan dalam Pembangunan Berkelanjutan*, Bandung, ISBN : 978-979-799-255-5.
- Soebowo, E., Tohari, A., dan Sarah, D., 2009, Potensi Likuefaksi Akibat Gempabumi Berdasarkan Data CPT dan N-SPT di Daerah Patalan, Bantul, Yogyakarta, *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan Jilid 19 No. 2 (2009)*, 85-97.
- THORNBURY, W. D., 1954, *Principles of Geomorphology*, John Wiley, New York.
- Todd, D.K., and Mays, L.W., 2005, Third Edition, *Groundwater Hydrology*, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.
- Untung, M., Udjang, K., and Ruswandi, E., 1973, Gayaberat di daerah Yogyakarta, Wonosari, Jawa Tengah, (Gravity Survey in the Yogyakarta, Wonosari Area, Central Java), Geological Survey of Indonesia, *Publikasi Teknik seri Geofisika*, No. 3, 7 h.
- Utkucu, M., 2006, Implications for the Water Level Change Triggered Moderate (M. 4.0) Earthquakes in Lake Van basin, Eastern Turkey, *Journal of Seismology* 10: 105-117.
- Van Zuidam, R.A., 1985., *Aerial Photo-Interpretation Terrain Analysis and Geomorphology Mapping*, Smits Publishers, The Hague: 442 pp.
- Verstappen, H.Th., 2000, *Outline of the Geomorphology of Indonesia: A Case Study on Tropical Geomorphology of a Tectogene Region*, ITC Publication, Number 79, Enschede.
- Verstappen, H. Th., 1983, *Applied Geomorphology: Geomorphological Surveys for Environmental Developments*, Elsevier, Amsterdam.
- Widijono, B.S., dan Subagio, 2009, Anomali Gaya Berat Sebagai Salah Satu Petunjuk Keterdapatan Gejala Struktur Geologi Daerah Jogjakarta dan sekitarnya, *Prosiding Workshop Geologi Pegunungan Selatan 2007*, Publikasi Khusus No. 38, ISBN 978-979-551-019-2, Pusat Survei Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Bandung, Indonesia.