



Analisis Multi Raster SRTM, Radarsat dan Landsat untuk Karakterisasi Morfo-struktur dari Geometri Sesar di Daerah Binuang Kalimantan Selatan

Multi Raster Image Analysis on SRTM, Radarsat and Landsat for Morpho-structure Characterization of Fault Geometry in Binuang Area South Kalimantan

Jamal¹, Nana Sulaksana¹, Emi Sukiyah¹ dan Yoga Andriana Sendjaja¹

Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran. Jln. Raya Bandung-Sumedang Km. 21 Jatinangor, Sumedang, Jawa Barat
 email: jamal.mamay.go@gmail.com

Naskah diterima : 29 Juni 2018, Revisi terakhir : 27 Februari 2019 Disetujui : 27 Februari 2019, Online : 27 Februari 2019
 DOI: 10.33332/jgsm.2019.v20.1.49-61

Abstrak-Daerah Binuang dan sekitarnya merupakan bentukan asal struktur yang dicirikan oleh jajaran punggung *cuesta* dengan pola kelurusan membusur berarah timurlaut-baratdaya. Pendekatan geomorfologi dilakukan untuk mengetahui geometri struktur geologi permukaan, melalui analisis multi peta secara kualitatif dan kuantitatif pada citra SRTM, Radarsat dan Landsat. Analisis kuantitatif data elevasi dilakukan untuk klasifikasi ketinggian, bentuk dan kecuraman lereng, kelurusan, pola pengaliran dan arah muka lereng. Klasifikasi rona dilakukan pada citra optis untuk menentukan pola dan batas sebaran batuan melalui analisis *band ratio*, *decorrelation stretch*, *principal componen analysis* dan *spatial enhancement*. Daerah penelitian tersusun oleh delapan bentukan lahan Asal Struktur yang merupakan gambaran dari deformasi yang terjadi di sayap barat Pegunungan Meratus. Geometri struktur permukaan menunjukkan adanya pengaruh tegasan kompresional yang diperlihatkan oleh zona lipatan dengan karakteristik memanjang dan membusur; antiklin yang dibatasi oleh sesar, dengan arah umum sumbu timurlaut-baratdaya. Perbandingan pola struktur utama permukaan di daerah Binuang dan sekitarnya dengan pola struktur model analog sistem sesar mendatar, memiliki tingkat korelasi tinggi ($R=0,932$). Struktur permukaan dapat berupa variasi lain dari *thrust mountain belt*; mungkin berupa *thrust-dominated restraining bends*.

Katakunci: Landsat, SRTM, morfostruktur, morfometri, pola *rhomboidal*, Meratus.

Abstract-The Binuang area and its surroundings are genetically structural landforms which characterized by *cuesta* ridge line with curve lineaments pattern on northeast-southwest direction. Geomorphological approach were carried out to determine structural geometry of geological surface using qualitative and quantitative approach on multiple map analysis of remote sensing data. The result of quantitative analysis on elevation data are used to classify heights, slope shape and steepness, lineaments, drainage, and slope aspect. Optical images were classified to determine lithological pattern and boundaries through analysis of band ratios, decorrelation stretch, principal component, and spatial enhancement. The research area are classified into eight class of structural landforms, depicting deformations that occurred in western flank of Meratus Mountains. The surface pattern indicates the influence of compressional stress, shown by fold belt with longitudinal characteristic and fault-bounded anticlines on northeast-southwest axis. The formation of main structure pattern on research area was compared with that on strike-slip fault analog model. The resulting correlation factor, $R=0.932$, shows that both of them are highly correlated. In conclusion, surface structure can possibly form another variation of thrust mountain belt, such as thrust-dominated restraining bends.

Keywords: landsat, SRTM, morphostructure, morphometry, rhomboidal pattern, Meratus.

PENDAHULUAN

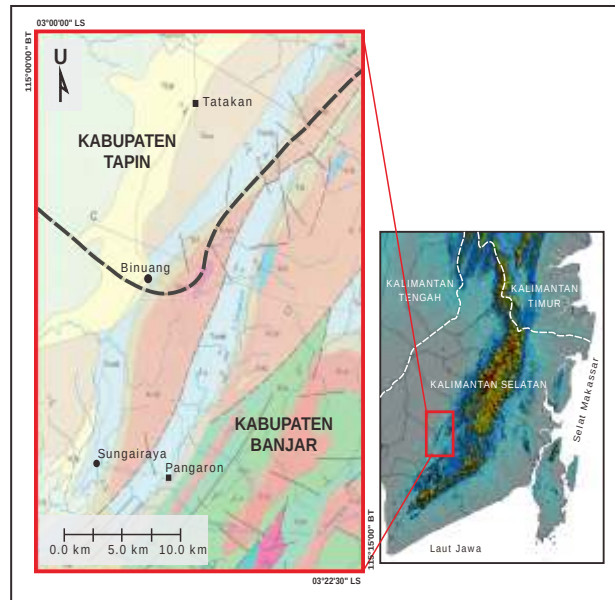
Binuang dan sekitarnya memperlihatkan topografi dengan geometri *rhomboidal* yang dibatasi oleh punggung membusur di sekelilingnya. Bagian tengah memperlihatkan topografi bertekstur kasar dan puncak-puncak meruncing dengan sebaran mengikuti bentuk *rhomboidal*. Pengamatan pada citra penginderaan jauh, bentukan tersebut menyerupai pola *pop-up* struktur atau antiformal dengan bentuk memanjang dan melancip di setiap ujungnya. Dimensi panjang utara ke selatan mencapai lebih dari 40 km, dan lebar bukaan mencapai lebih dari 8 km. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Belimbing (Heryanto dkk., 1998) topografi perbukitan membusur ditempati oleh Formasi Tanjung berumur Eosen sedangkan topografi di bagian tengah tersusun oleh Formasi Pitanak, Formasi Keramaian yang berumur Kapur Akhir dan Granit berumur Kapur Awal. Struktur geologi di daerah ini terdiri atas lipatan, sesar naik, sesar mendatar dan sesar normal yang mengikuti pola umum struktur Pegunungan Meratus dengan arah timurlaut-baratdaya (Heryanto, 2010; Kusumah, 2016, Witts dkk., 2015).

Binuang dan sekitarnya terletak di sayap barat Pegunungan Meratus yang berbatasan dengan tepian timur Cekungan Barito, Kalimantan Selatan. Pembahasan struktur dan tektonika di pegunungan ini telah dilakukan oleh banyak peneliti terdahulu dengan berbagai kesimpulan berbeda, diantaranya Sikumbang (1986), Satyana dan Silitonga (1994), Heryanto (2010), dan Witts dkk. (2014).

Analisis spasial data penginderaan jauh melalui pendekatan geomorfologi dapat menggambarkan keterkaitan pola, antar aspek morfologi dan sebaran pola spasial sebagai indikator deformasi dan kontrol struktur (Mwaniki dkk., 2015; Mathew dkk., 2016; Simon dkk., 2016). Topik penelitian mengenai keterkaitan topografi dengan pola struktur geologi di daerah Binuang dan sekitarnya menarik untuk dikaji, terlebih analisis keterlibatan variabel pola spasial seperti morfografi, morfometri dan *morpho-arrangement* yang belum pernah dilakukan.

Penelitian dimaksudkan adalah untuk mengetahui pola spasial yang terbentuk melalui karakterisasi unit morfologi, geometri dan orientasi objek dengan analisis data penginderaan jauh. Hasil geometri struktur geologi yang mengontrol pola bentangalam di daerah penelitian dibandingkan dengan acuan model struktur yang dilakukan di laboratorium (McClay dkk., 2000; McClay dan Bonora, 2001). Tujuan penelitian diharapkan dapat mengetahui dan melengkapi model struktur di daerah Binuang dan sekitarnya.

Daerah penelitian, secara administrasi termasuk dalam wilayah Kabupaten Tapin dan Kabupaten Banjar, Provinsi Kalimantan Selatan. Secara geografis terletak pada koordinat 3°00'00" - 3°22'30" LS dan 115°00' - 115°15' BT (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi penelitian (kotak dengan garis merah) termasuk dalam batas administrasi Provinsi Kalimantan Selatan.

GEOLOGI REGIONAL

Kalimantan bagian selatan secara fisiografi dibentuk oleh Pegunungan Meratus yang memisahkan Cekungan Barito dan Cekungan Asem-Asem. Sikumbang (1986) membagi fisiografi di daerah Pegunungan Meratus menjadi empat satuan, yaitu: 1) Daerah Pedataran yang disusun oleh batuan berumur Kuartar, 2) Daerah Perbukitan yang disusun oleh batuan berumur Tersier, 3) Daerah Pegunungan disusun oleh batuan Kapur Awal, yang dibagi menjadi dua pegunungan, yaitu Barisan Bobaris dan Barisan Manjam yang keduanya memanjang berarah timurlaut-baratdaya, dan 4) Cekungan Manunggul yang terletak di bagian tengah dan disusun oleh batuan Kapur Akhir.

Berdasarkan kelompok umur batuanya, Heryanto (2010) membagi stratigrafi regional Pegunungan Meratus dan Cekungan Barito bagian timur menjadi tiga satuan utama, yaitu 1) Satuan stratigrafi pra-Kapur Akhir, terdiri atas batuan yang berumur lebih tua dari Kapur Akhir dengan kontak satu sama lain berupa kontak sesar, 2) Satuan stratigrafi Kapur Akhir, yaitu kelompok batuan yang tersusun oleh batuan Kapur Akhir, yang terdiri atas batuan sedimen dan batuan vulkanik, dan 3) Satuan stratigrafi Pasca Kapur Akhir, yaitu kelompok batuan yang berumur lebih muda dari Kapur Akhir atau batuan Kenozoikum.

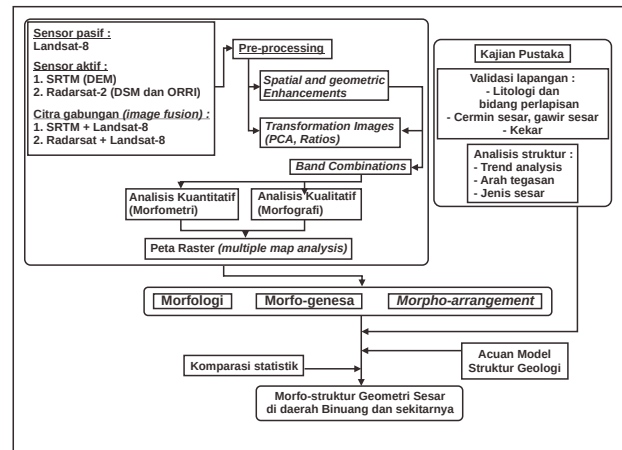
Berdasarkan kelurusan sesar pada Jalur Meratus, Sikumbang (1986) membagi struktur geologi regional menjadi tiga arah umum, yaitu: 1) Sesar dengan arah $U230^{\circ}T - U050^{\circ}T$, 2) Sesar dengan arah $U240^{\circ}T - U060^{\circ}T$, dan 3) Sesar dengan arah $U210^{\circ}T - U030^{\circ}T$. Ketiga arah sesar tersebut mencerminkan tiga peristiwa tektonik dengan arah tekanan kompresi beda.

METODOLOGI

Analisis geomorfologi dilakukan pada citra Landsat 8 dengan resolusi spasial 30 m, citra DEM Radarsat (resolusi spasial 10 m) dan citra *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), yang mempunyai resolusi spasial 30 m (Bamler and Wessling, 1999). Seluruh data diproyeksikan ke dalam sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) zona 50S datum WGS-84. Pengolahan citra Landsat secara digital untuk meningkatkan kualitas visualisasi citra, yaitu kombinasi kanal 457, 321 dan 743; pengolahan citra *principal component analysis* (PCA); *band ratio*; dan *image stretching*. Pengolahan *shaded relief*, *slope*, *aspect* dan *height slice* dilakukan pada citra SRTM dan DEM Radarsat untuk ekstraksi digital unsur morfologi dan morfometri (Khan and Glenn, 2012; Henderson dkk., 1996; Abdullah dkk., 2013; Simon dkk., 2016).

Kriteria dan teminologi yang digunakan untuk karakterisasi unit-unit bentangalam mengacu *The ITC System of Terrain Analysis and Classification* (Van Zuidam, 1985), dengan metode pendekatan analitik dan sintetik. Pengenalan dan identifikasi bentangalam dilakukan melalui tiga aspek utama geomorfologi. Aspek pertama adalah morfologi yang meliputi morfografi, dan morfometri. Aspek kedua, adalah morfogenesis yang mekaji tentang asal mula pembentukan bentangalam dan proses-proses yang mempengaruhinya. Aspek ketiga adalah *morpho-arrangement* yaitu susunan/pola spasial dan keterkaitan antara satu bentuk lahan dengan lainnya dalam suatu proses terkait (Gambar 2).

Pola struktur geologi hasil interpretasi divalidasi dengan pengukuran elemen struktur di lapangan, yang meliputi kekar, cermin sesar, dan kemiringan batuan. Pola struktur permukaan selanjutnya dibandingkan dengan model hasil penelitian laboratorium menurut McClay and Bonora (2001) untuk merekonstruksi mekanisme morfo-struktur di daerah penelitian.



Sumber: Modifikasi dari: Van Zuidam, 1985; Jordan, 2003; Sidarto, 2010; Sukiyah, 2017

Gambar 2. Diagram alir penelitian Morfo-struktur daerah Binuang dan sekitarnya berdasarkan data penginderaan jauh.

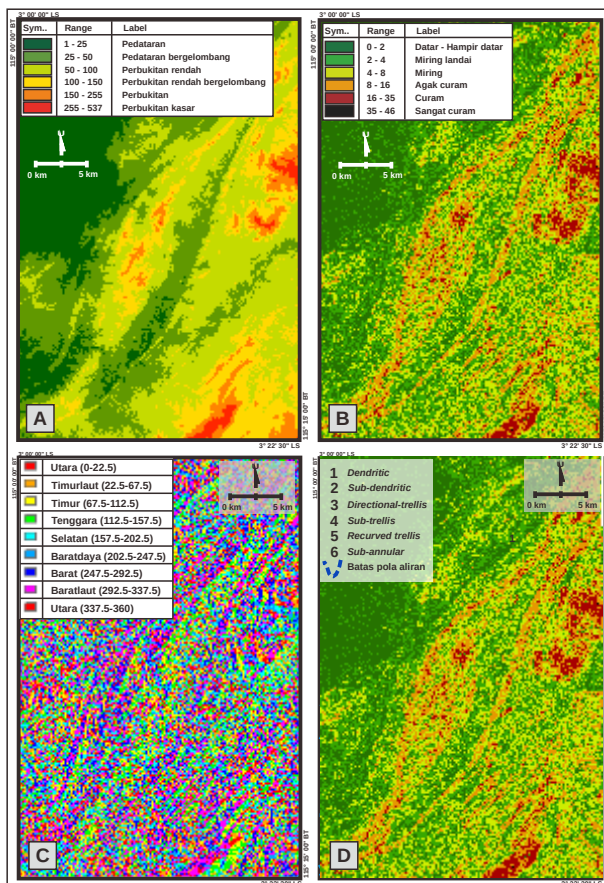
HASIL DAN ANALISIS

Morfologi

Karakterisasi aspek morfologi meliputi unsur ketinggian relatif, kemiringan lereng, *aspect*, dan pola aliran, dilakukan pada citra SRTM (Gambar 3). Klasifikasi ketinggian relatif dapat dibedakan menjadi 6 (enam) kelas yang mengacu pada klasifikasi Van Zuidam (1985), yaitu: (1) Pedataran dengan ketinggian 1-25 m; (2) Pedataran bergelombang dengan ketinggian 25-50 m; (3) Perbukitan rendah dengan ketinggian 50-100 m; (4) Perbukitan rendah bergelombang dengan ketinggian 100-150 m; (5) Perbukitan dengan ketinggian 150-255 m; dan (6) Perbukitan kasar dengan ketinggian 255-537 m (Gambar 3A).

Klasifikasi kemiringan lereng pada citra SRTM menghasilkan 6 (enam) kelas, yaitu: (1) Hampir datar – datar dengan kemiringan 0° - 2° ; (2) Miring landai dengan kemiringan 2° - 4° ; (3) Miring dengan kemiringan 4° - 8° ; (4) Agak curam dengan kemiringan 8° - 16° ; (5) Curam dengan kemiringan 16° - 35° ; dan (5) Sangat curam dengan kemiringan 35° - 46° (Gambar 3B).

Klasifikasi arah muka lereng (*aspect map*) menggambarkan dengan sangat baik pola bentukan topografi akibat struktur di daerah Binuang dan sekitarnya. Kelompok arah muka lereng berarah barat dan barat laut, menunjukkan pola *anastomosing* terutama pada topografi perbukitan sebagai pola membusur berkesinambungan (Gambar 3C).



Gambar 3.(A) Klasifikasi ketinggian relatif, (B) Kelas kemiringan lereng, (C) Bentuk topografi membusur pada peta aspect (D) Pola pengaliran.

Identifikasi dan deliniasi pola aliran dilakukan melalui metode *flow direction* dan *flow accumulation* dengan parameter *coverage 50 pixel cell count*. Enam jenis pola aliran dapat diidentifikasi melalui perbandingan visual pola umum dan modifikasi jenis pengaliran (Howard, 1967; dalam Van Zuidam, 1985) yaitu: (1) Pola memancar (*dendritic*); (2) Pola agak memancar (*sub-dendritic*); (3) menangga berarah (*directional trellis*); (4) Pola agak menangga (*sub-trellis*); (5) Pola lengkung menangga (*recurved trellis*); dan Pola agak lingkaran memusat (*sub-annular*) (Gambar 3D).

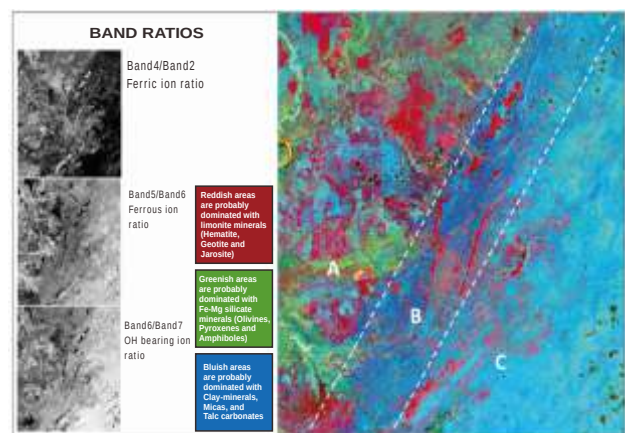
Morfogenesis

Morfogenesis difokuskan pada identifikasi pola sebaran batuan dan asosisasinya dengan sebaran formasi regional. Beberapa teknik pengolahan digital dilakukan untuk mendelineasi kelompok sebaran dengan nilai spektrum berbeda citra. Perbedaan pola spasial setiap kelompok berasosiasi dengan jenis dan sebaran batuan. Kelompok tersebut memiliki informasi terkait tingkat vegetasi, topografi, batuan, dan unsur

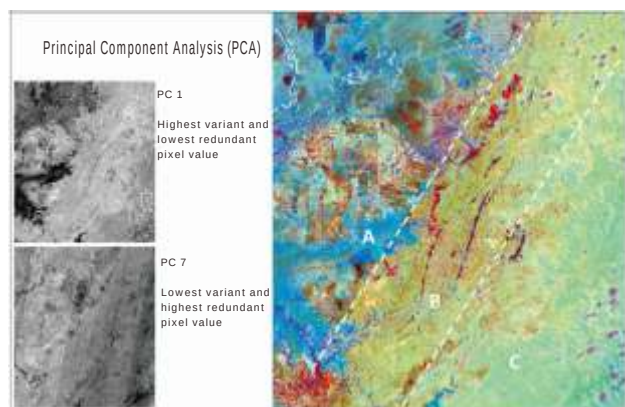
lainnya yang menjadi satu sebagai *mixture element* (Drury, 2001).

Deskriminasi pola sebaran batuan menggunakan band ratio pada citra Landsat-8 yang mengacu Simon dkk. (2016). Rasio kanal 4/2 (*greyscale image*), berfungsi untuk melihat adanya variasi spasial sensitif terhadap tutupan lahan yang mengandung unsur ferric ion. Rasio kanal 5/6 menghasilkan citra rona abu-abu yang sensitif terhadap tingkat konsentrasi unsur ferrous ion pada objek di permukaan. Rasio kanal 6/7 menghasilkan citra hitam putih yang sensitif terhadap unsur mineral lempung (*OH bearing ion*). Ketiga citra rasio tersebut, dikombinasikan melalui *band composite R:4/2, G:5/6* dan *B:6/7* untuk menghasilkan citra berwarna yang menggambarkan kelompok sebaran objek yang berasosiasi dengan dominasi mineral limonit (A: merah), mineral silikat Fe-Mg (C: hijau-kebiruan) dan dominasi mineral lempung (B:biru) (Gambar 4).

Analisis citra melalui metode *principal component analysis* (PCA) menghasilkan sebanyak 7 (tujuh) citra abu-abu yang dibagi berdasarkan tingkatan variasi dan pengulangan (*redundant*) nilai pixelnya. PC1 adalah citra tonal yang memiliki tingkat variasi paling tinggi dan *redundant pixel* paling rendah, artinya pada citra PC1 ditemukan banyak variasi objek untuk dapat dikenali dan dibedakan. Sebaliknya pada PC7 akan banyak ditemukan nilai pixel yang berulang (*redundant*) dengan tingkat variasi paling rendah, sehingga sulit untuk dapat dilakukan pengenalan objek-objek di permukaan. Kombinasi kanal citra PC1, PC2 dan PC3 memiliki nilai varian tertinggi, dan digunakan untuk mengetahui pola sebaran tutupan lahan di permukaan yang berasosiasi dengan sebaran jenis batuan (Gambar 5).



Gambar 4. Hasil Band Ratio citra Landsat R:4/2, G:5/6 dan B:6/7, menunjukkan kelompok sebaran objek yang berasosiasi dengan dominasi mineral limonit (A: merah), mineral silikat Fe-Mg (C: hijau/kebiruan) dan mineral lempung (komposisi Al-OH) (B: biru).

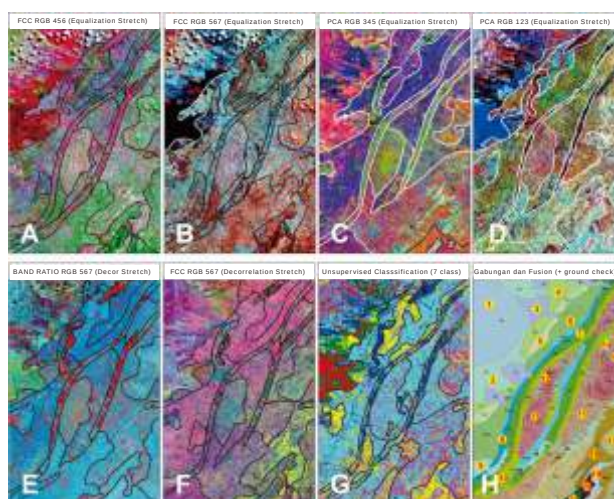


Gambar 5. *Principal component analysis (PCA)* yang membagi image berdasarkan tingkatan nilai pixelnya, dengan variasi paling tinggi dan *redundant value* paling rendah. Kombinasi R: PC1, B: PC2 dan B: PC3 menunjukkan adanya perbedaan kelompok objek (A, B dan C) yang dibatasi oleh suatu kelurusan dan berasosiasi dengan sebaran jenis batuan.

Hasil analisis citra Landsat melalui *Band Ratio* dan *Principal Component Analysis* menunjukkan beberapa pola spasial yang berkaitan dengan pola sebaran batuan, dan dapat dikenali dan dibedakan. Secara umum terdapat 3 (tiga) kelompok objek yang ditunjukkan oleh huruf A, B dan C pada citra. Ketiga kelompok tersebut membentang dan dibatasi oleh suatu kelurusan yang berarah timurlaut-baratdaya, dan mengikuti arah umum struktur regional. Berdasarkan validasi di lapangan dan Peta Geologi Lembar Belimbing (Heryanto dkk., 1998) menunjukkan bahwa perbedaan pola spasial citra berhubungan dengan batuan pra-Tersier sampai Kuartar. Kelompok objek-C di bagian timur berasosiasi dengan batuan kaya unsur mineral silikat Fe-Mg, mencirikan daerah ini didominasi oleh batuan beku basaltik. Objek di bagian tengah diwakili oleh kelompok-B dengan dominasi objek yang memiliki kandungan mineral lempung, yang sesuai dengan sebaran batuan sedimen Tersier dan tersusun atas batupasir perselingan batulempung Formasi Tanjung dan Warukin. Kelompok-B diselingi oleh objek berwarna merah pada citra diinterpretasikan sebagai objek dengan dominasi unsur Fe; dan berdasarkan validasi di lapangan merupakan lajur daerah pertambangan batubara. Pola spasial di bagian barat menunjukan warna percampuran hijau, merah dan kebiruan (citra *band ratio*) dan dominasi warna kebiruan (citra PCI) dengan tekstur topografi halus dan datar; disimpulkan sebagai kelompok batuan sedimen Kuartar.

Pengolahan digital *band combination*, *image transformations*, *equalization and decorrelation stretch* pada tujuh data citra, menunjukkan pola spasial yang berasosiasi dengan batas sebaran jenis batuan.

Delineasi sebaran dihasilkan citra adalah (A) RGB 456 *Equalization stretch*; (B) RGB 567 *Equalization stretch*; (C) PCA RGB 345 *Equalization stretch*; (D) PCA RGB 123 *Equalization stretch*; (E) *Band Ratio Decorrelation Stretch*; (F) RGB 567 *Decorrelation Stretch*; (G) *Unsupervised Classification Map*; dan (H) Peta Geologi hasil interpretasi dan validasi lapangan (Gambar 6).



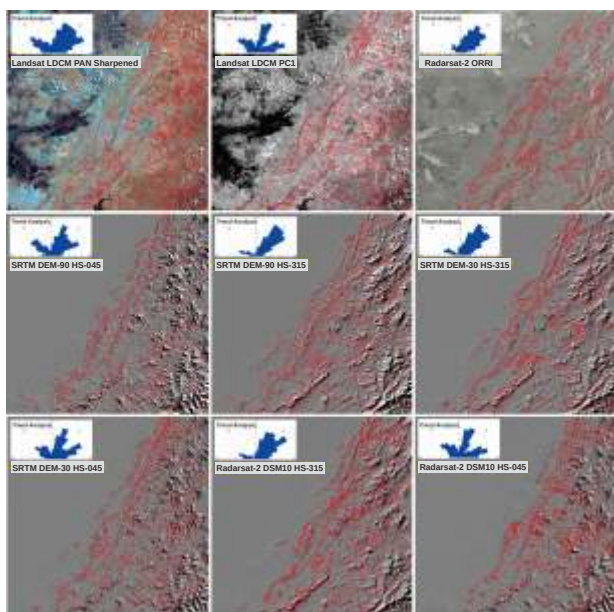
Gambar 6. Peta sebaran pola spasial yang dihasilkan dari pengolahan *band combination*, *image transformations*, *equalization and decorrelation stretch*; menunjukkan kelompok spektrum berbeda pada citra Landsat. Batas-batas sebaran formasi batuan di daerah Binuang dan sekitarnya dikategorikan dalam 21 kelas (lingkaran kuning) hasil gabungan seluruh citra yang divalidasi melalui survei lapangan.

Batas sebaran diwakili oleh kelompok spektrum warna yang menggambarkan informasi variasi objek di permukaan bumi. Perbedaan tersebut tidak dinyatakan secara langsung sebagai objek khusus geologi, namun dapat berhubungan dengan batas penyebaran batuan. Batas pola dan sebaran, secara umum memiliki keseragaman setiap citra hasil pengolahan, namun beberapa hal terperinci terdapat perbedaan. Hasil akhir berupa peta geologi interpretasi berdasarkan gabungan hasil pengolahan tujuh data citra dan hasil pengamatan di lapangan dan acuan pada peta geologi regional Lembar Belimbing (Heryanto dkk., 1998) dan Lembar Binuang (Kusumah dkk., 2016). Kedua puluh satu kelompok tersebut berasosiasi dengan sebaran batuan sebagai berikut: (Gambar 6) yaitu: 1) Endapan Rawa (Qsw); 2) Endapan Limpah Banjir (Qfp); 3) Endapan Limpah Banjir 2 (Qfp2); 4) Formasi Dahor (Qdgc); 5) Anggota batupasir, Formasi Warukin (Nmws); 6) Anggota batulempung, Formasi Warukin (Nmwl); 7) Anggota batulempung, Formasi Tanjung (Petcl); 8) Formasi Bera (Ombl); 9) Aluvium (Qa); 10) Anggota batupasir, Formasi Tanjung (Pets); 11) Formasi

Keramaian (Kpk); 12) Granit (Kgr); 13) Formasi Pitanak (Khpi); 14) Olistolit Rampah (Krl); 15) Diorit (Kdi); 16) Formasi Pudak (Kpp); 17) Formasi Manunggul (Kpm); 18) Formasi Paau (Khp); 19) Formasi Paniungan (Kp); 20) Diorit (Mdi); dan 21) Batuan ultramafik (Mu).

Kelurusan struktur dan Arah jurus / kemiringan lapisan batuan

Citra SRTM resolusi 90 m dan 30 m dan Radarsat resolusi 10 m ditingkatkan kualitas visualnya melalui metode *hillshade surface model*. Metode ini dilakukan untuk mempertajam unsur topografi seperti kelurusan lembah dan punggung dengan memanipulasi arah (*sun azimuth*) dan sudut penyorotan (*sun angle*). Sebanyak delapan *hillshade images* dihasilkan dari sun azimuth 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, dan 315° dengan sun angle 45°. Pengamatan visual dilakukan untuk memilih citra dengan tampilan terbaik yang dapat menunjukkan arah kelurusan. Citra dengan arah penyorotan U045°T dan U315°T dipilih sebagai dataset yang dipergunakan untuk analisis raster. Pemilihan tersebut didasarkan atas kesesuaiannya dengan hasil penelitian Satyana dan Silitonga (1994) yang menyebutkan bahwa daerah penelitian dipengaruhi oleh dua rejim deformasi dengan arah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Sebanyak 9 peta kelurusan dihasilkan melalui analisis kelurusan lembah dalam skala perbesaran 1:25.000. Daerah yang diperkirakan sebagai kelurusan struktur adalah zona lemah (Gambar 7).



Gambar 7. Sembilan peta kelurusan dihasilkan dari citra yang berbeda melalui analisis kelurusan lembah dalam skala perbesaran 1:25.000 pada *binary raster map*. *Trend analysis* menunjukkan arah populasi dominan timurlaut-baratdaya dan baratlaut-tenggara.

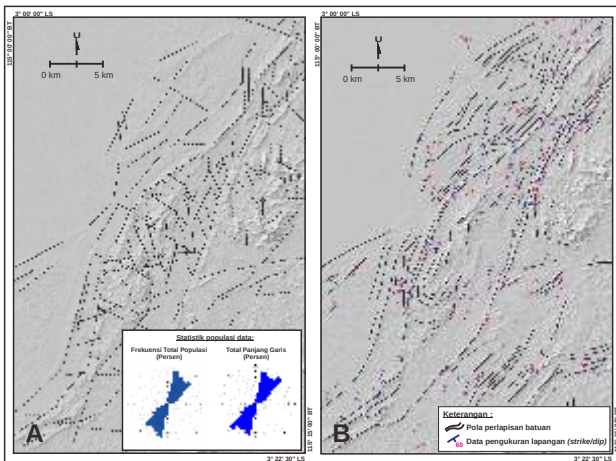
Hasil interpretasi kelurusan setiap citra menunjukkan pola umum yang hampir sama. Hasil interpretasi pada citra Radarsat (HS-045, HS-315 dan ORRI), SRTM-90 (HS-045 dan HS-315), SRTM-30 (HS-045 dan HS-315), Landsat (PAN sharp dan PC1), menunjukkan nilai frekuensi persen total populasi dan kelompok arah kelurusan dominan timurlaut-baratdaya, baratlaut-tenggara, utara timurlaut-selatan baratdaya, timur timurlaut-barat baratdaya, dan barat baratlaut-timur tenggara.

Pola arah jurus perlapisan batuan sedimen diperoleh dari interpretasi citra gabungan (*fusion image*) Landsat dan SRTM (Gambar 8). Pada pola perlapisan terutama pada Formasi Tanjung dan Warukin terlihat arah umum timurlaut-baratdaya. Kemiringan lapisan batuan semu diinterpretasi pada citra melalui *dip-slope* atau arah kemiringan lerengnya. Plot diagram roset data *strike/dip* perlapisan batuan Formasi Tanjung dan Warukin, hasil pengukuran di lapangan menunjukkan populasi terbesar memiliki arah U045°T dan arah U015°T. Hal tersebut menunjukkan orientasi arah yang berkesesuaian dengan analisis pola struktur data penginderaan jauh.

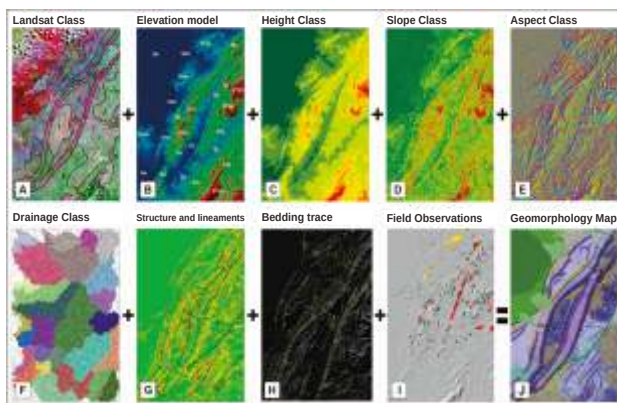
Geomorfologi Daerah Binuang dan Sekitarnya

Hasil analisis aspek pola sebaran batuan, morfografi dan morfometri diintegrasikan untuk analisis geomorfologi (Gambar 9). Bentuk lahan di daerah penelitian dibagi menjadi tiga kategori umum, yaitu: 1) Bentuk asal struktur; 2) Bentuk asal denudasi; dan 3) Bentuk asal fluvial. Berdasarkan karakteristik khusus, masing-masing bentuk asal dibedakan menjadi sub-kelas.

Secara keseluruhan bentuk lahan di daerah penelitian dibagi menjadi 17 (tujuh belas) sub-kelas (Gambar 10), yaitu (1) Perbukitan Lereng Asimetris / *Cuesta* (S1); (2) Punggungan Perbukitan Rendah Sayap Antiklin (S2); (3) Lembah Sinklin (S3); (4) Dataran Antiklin (S4); (5) Punggungan Perbukitan Sejajar Tertoreh Kuat (S5); (6) Perbukitan Rendah di Sayap Antiklin Tertoreh Lemah (S6); (7) Perbukitan Antiklin dengan Puncak Tak Teratur (S7); (8) Perbukitan Terdenudasi dengan Puncak Membulat (D1); (9) Lereng Perbukitan Rendah Terdenudasi (D2); (10) Dataran Bergelombang Terdenudasi (D3); (11) Perbukitan Rendah Terdenudasi (D4); (12) Bukit Sisa (D5); (13) Perbukitan Terdenudasi dengan Puncak Meruncing; (14) Dataran banjir (F1); (15) Rawa Buri (F2); (16) Kipas Aluvial (F3); (17) Endapan Sungai Aktif (F4).



Gambar 8. (A) Kompilasi kelurusan struktur daerah Binuang dan sekitarnya Kalimantan Selatan, (B) Hasil interpretasi citra gabungan (fusion image) Landsat dan SRTM berupa Peta Pola Jurus Perlapisan Batuan. Garis merah adalah validasi pengukuran *strike/dip* di lapangan.



Gambar 9. Peta Geomorfologi daerah Binuang dan sekitarnya yang disimpulkan berdasarkan kompilasi peta-peta raster hasil analisis citra penginderaan jauh (J). Analisis unsur-unsur meliputi: A) batas satuan batuan, B) relief, C) ketinggian, D) lereng, E) arah muka lereng, F) pola pengaliran, G) kelurusan, H) pola jurus perlapisan, dan I) stasiun pengamatan lapangan.

Berdasarkan peta geomorfologi, bentuk lahan daerah penelitian didominasi bentuk lahan asal struktur, yang berarti topografi daerah ini dikontrol oleh struktur geologi. Bentuk asal struktur (S1), merupakan perbukitan memanjang asimetris (*cuesta*), sudut curam sebagai *front slope*, dan sudut kemiringan landai merupakan *back slope*. Penampakan ini merupakan penciri bahwa sesar utama sebagai sesar naik. Perbukitan memanjang membentuk morfologi *double bend* dengan punggung bersatu di bagian utara dan selatan, sementara itu di bagian tengah, morfologi tersusun oleh batuan berumur tua, yang membentuk struktur antiformal dan sinfomal dengan sumbu berarah timurlaut-baratdaya. Pola Morfologi Endapan

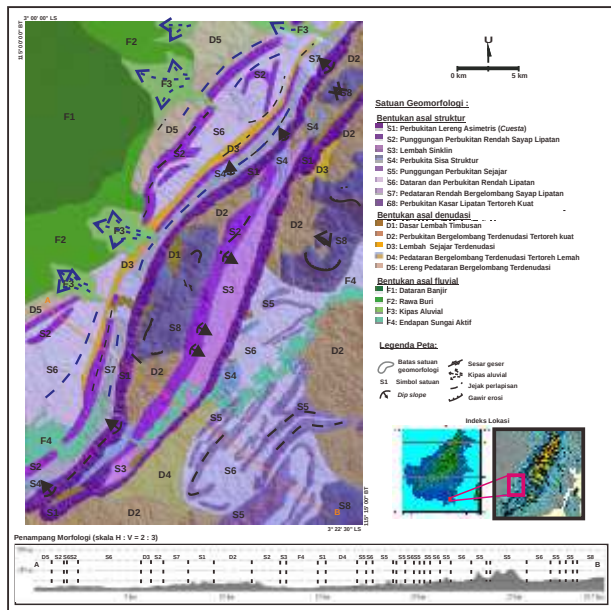
Sungai Aktif (S4) di bagian timur dicirikan oleh pola morfologi membusur, yang menunjukkan bahwa perkembangan sungai dikontrol sesar, yaitu sungai merupakan zona rekahan, yang lemah terhadap erosi dan membentuk lembah timurlaut-baratdaya. Perkembangan kipas aluvium yang membentang dengan arah timurlaut-baratdaya (F3) mengindikasikan adanya sesar; dimana bagian timur relatif naik (batuan yang tersingkap berumur lebih tua) terhadap bagian barat. Berdasarkan penampakan ini, dapat diidentifikasi bahwa batasnya merupakan sesar naik.

Morfo-Struktur Daerah Binuang dan Sekitarnya

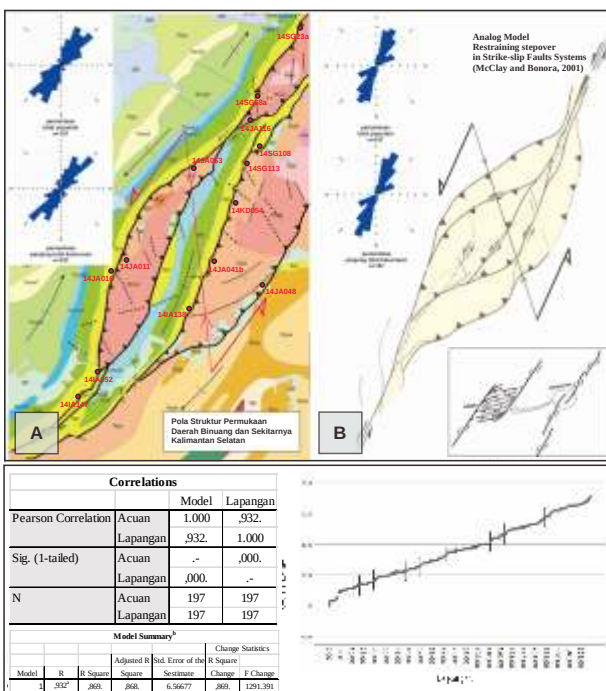
Kompilasi analisis pola struktur pada citra penginderaan jauh menunjukkan kelurusan dapat dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan arah/orientasinya. Geometri pola struktur berdasarkan elemen morfologi dan kelurusan dari hasil analisis data penginderaan jauh, kemudian dibandingkan dengan pola struktur regional dan model analog sistem sesar mendatar (McClay dan Bonora, 2001), untuk mendapatkan model skematik pembetulan morfo-struktur di daerah penelitian.

Pola struktur daerah penelitian memiliki kemiripan dengan model pola struktur hasil percobaan di dalam laboratorium (*sandbox*) yang dibuat oleh McClay and Bonora (2001), yang dipengaruhi oleh gaya kopel utara timurlaut-selatan baratdaya (Gambar 11). Hal ini mencirikan pola struktur geologi yang dipengaruhi oleh suatu gaya berpasangan dan dikontrol oleh sistem sesar mendatar yang tersegmentasi (*step-over*). Berdasarkan kesebandingan tersebut, model pola struktur di daerah Binuang dapat diinterpretasikan sebagai bentuk deformasi elipsoid dengan arah pemendekan (*shortening*) baratlaut-tenggara. Pengujian statistik terhadap pola kelurusan, dilakukan melalui uji komparasi dan uji korelasi. Trend analysis terhadap struktur yang berkembang di daerah penelitian, polanya memiliki kemiripan dengan model yang dibuat menggunakan konsep sesar mendatar. Kesamaan pola struktur di daerah penelitian dengan model analog, memiliki korelasi tinggi dengan nilai $R=0,932$.

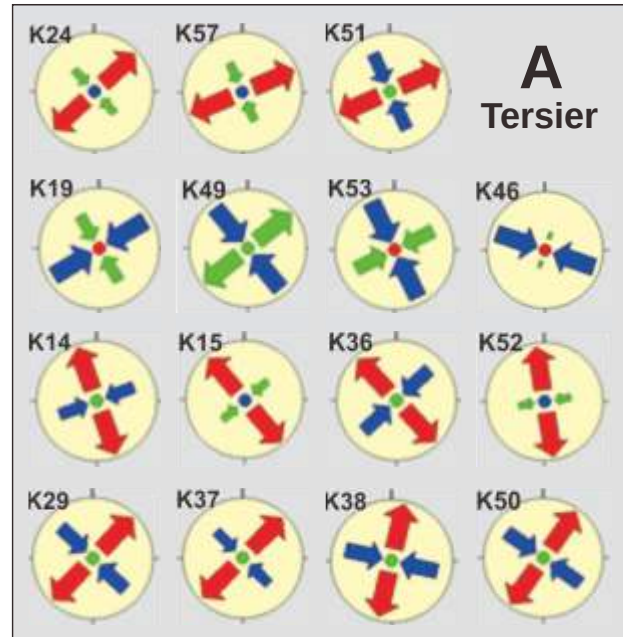
Validasi hasil interpretasi struktur dilakukan dengan analisis kekar di 15 stasiun pengamatan, yaitu pada Formasi Dahor berumur Plistosen, dan Formasi Tanjung, Formasi Berau serta Formasi Warukin berumur Tersier. Hasilnya menunjukkan dominasi tegasan dipengaruhi oleh sistem tegasan pergerakan mendatar (*strike slip*) (Gambar 12).



Gambar 10. Peta Geomorfologi daerah Binuang dan sekitarnya berdasarkan kompilasi peta-peta raster hasil analisis citra penginderaan jauh. Unsur-unsur morfologi, morfostruktur dan morfometri menghasilkan pembagian unit bentuk lahan di daerah penelitian menjadi tiga kategori umum, yaitu: 1) Bentuk asal struktur; 2) Bentuk asal denudasi; dan 3) Bentuk asal fluvial. Ketiga bentuk asal tersebut terbagi menjadi 17 (tujuh belas) sub-kelas geomorfologi.



Gambar 11. (A) Pola struktur geologi daerah Binuang dan sekitarnya, (B) model pola struktur hasil percobaan laboratorium (*sandbox*). Perbandingan pola struktur (A dan B) memiliki kemiripan dengan pola struktur pada sistem sesar mendatar. Elemen struktur terdiri dari lipatan yang dibatasi oleh sesar naik dengan pola membusur dengan arah utara timurlaut-selatan baratdaya. Titik merah adalah lokasi pengamatan di lapangan.



Gambar 12. Analisis kekar di 15 stasiun pengamatan pada formasi berumur Tersier-Kuarter menunjukkan sistem tegasan mendatar (*strike slip*) dengan arah kompresi relatif barat-laut-tenggara (K24, K57, K51, K29, K37, K38 dan K50).

Pengamatan elemen struktur di 15 lokasi pada sepanjang jalur sesar, menunjukkan indikasi sesar dengan sifat pergerakan naik, juga memiliki komponen mendatar (*oblique*). Indikasi adanya *flower structure* ditemukan pada stasiun 14-SG-108 dan 14-SG-113. Hadirnya elemen struktur berupa shear band dan offset litologi sebagai penciri sesar mendatar ditemukan di stasiun 14-SG-068a, 14-JA-016, 14-JA-011, 14-KD-054, dan 14-JA-048. Penciri adanya pengaruh kompresional, ditemukan adanya *dragfold* di stasiun 14-SG-23a, 14-JA-041b dan 14-JA-041. Cermin sesar yang menunjukkan pergerakan *oblique* ditemukan di stasiun 14-JA-116, 14-IA-147 dan 14-IA-138 (Gambar 13).

DISKUSI

Analisis morfometri pada citra SRTM, Radarsat dan analisis spasial pada citra Landsat memberikan gambaran sangat baik terhadap morfo-struktur di daerah penelitian. *Slope analysis* merupakan hal paling menentukan untuk identifikasi lipatan, jejak perlapisan batuan, dan kelurusan. Penajaman citra Landsat melalui *image transformation* dan *band ratio* cukup memberikan gambaran adanya perbedaan batas formasi, namun masih diperlukan proses delineasi batas lebih terperinci secara visual melalui citra gabungan (*image fusion*) SRTM–Landsat.



Gambar 13. Foto elemen struktur yang ditemukan pada sepanjang zona sesar, menunjukkan pergerakan naik yang juga memiliki unsur mendatar (*oblique*). Indikasi sesar mendatar diperlihatkan oleh shear band beberapa lokasi.

Struktur geologi permukaan terdiri atas antiklin, sinklin, sesar naik, sesar mendatar sebagian besar berarah utara timurlaut-selatan baratdaya. Bentuklahan daerah penelitian didominasi oleh bentukan asal struktur, berupa bentukan pasif morfostruktur, yaitu cuesta, perbukitan sayap antiklin, lembah sinklin, perbukitan antiklin tertoreh kuat, perbukitan sayap antiklin tertoreh lemah dan bukit sisa struktur. Bentukkan aktif morfostruktur sangat jelas terlihat pada satuan geomorfologi berupa struktur antiklin dan sinklin. Bentukkan asal struktur terutama pada batuan yang memiliki resistensi tinggi terhadap pelapukan, seperti batupasir Formasi Tanjung berumur Tersier dan batuan sedimen Formasi Pitanak berumur pra-Tersier. Bentuk lahan yang ditandai oleh aktifitas denudasi, dijumpai pada batuan yang relatif mudah mengalami pengikisan dan pelarutan seperti pada batupasir Formasi Dahor berumur Kuarter dan batugamping Formasi Berai berumur Tersier.

Struktur utama berupa sesar naik memisahkan formasi batuan Kuarter di bagian timur. Sesar naik yang terjadi di bagian tengah membentuk morfologi *cuesta* pada Formasi Tanjung, disertai lipatan besar yang membagi formasi menjadi tiga lajur. Batuan pra-Tersier yang terdiri Formasi Pitanak terangkat ke permukaan,

membentuk morfologi perbukitan-pegunungan diantara lajur Formasi Tanjung. Sesar naik ditandai pula oleh satuan morfologi sungai aktif yang lintasannya membusur searah dengan jalur struktur. Pola sungai aktif ini dikontrol oleh struktur di zona lemah pada batuan pra-Tersier.

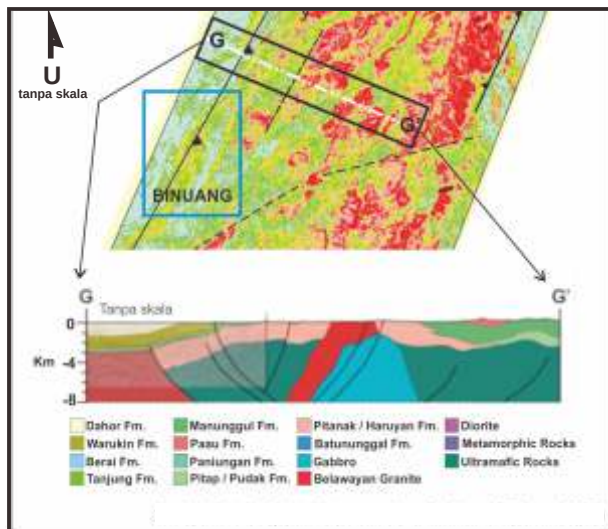
Sesar penyerta, terutama sesar mendatar dengan segmen kelurusan pendek berarah baratlaut-tenggara. Sesar tersebut merupakan sesar yang terjadi setelah sesar utama terbentuk dengan arah menyilang terhadap pola struktur membusur.

Lipatan (antiklin dan sinklin) yang terdapat di bagian baratlaut terjadi pada batuan Tersier, dan di bagian tenggara pada batuan pra-Tersier. Arah sumbu lipatan timurlaut-baratdaya diduga terbentuk oleh tegasan regional.

Pola struktur geologi utama di permukaan, secara umum hampir seluruhnya memiliki orientasi yang sama; mencirikan polanya dipengaruhi oleh suatu aktifitas tektonik yang sama. Pola struktur berumur lebih tua, mungkin telah hancur atau tersamarkan akibat pengaruh tektonik terakhir yang tercermin di permukaan.

Diskusi yang mengemuka terhadap analisis geometri struktur permukaan adalah, bagaimana mekanisme yang mengontrol pembentukan struktur tersebut; apakah merupakan produk yang dihasilkan oleh sistem sesar mendatar timurlaut-baratdaya seperti yang disebutkan oleh Sikumbang (1986) dan Bon dkk. (1998); atau merupakan akibat dari sistem kontraksi yang menghasilkan sesar-sesar naik seperti yang dikemukakan oleh Satyana dan Silitonga (1994) dan Heryanto dkk. (1998). Sapiie dan Rifiyanto (2017) membuat model penampang geologi yang memberikan ilustrasi structural style dan berkembang di sayap barat Pegunungan Meratus (Gambar 14).

Yusuf, dkk. (2015) telah melakukan analisis kekar di Daerah Binuang, yang menyimpulkan bahwa evolusi tektonik Daerah Binuang terdiri atas : tektonik Pra Kenozoikum - Eosen yang mengontrol adanya rifting timurlaut-baratdaya dan sesar normal baratlaut-tenggara. Tektonik Pliosen yang ditandai adanya kompresi baratlaut-tenggara, menyebabkan terjadinya lipatan dan sesar naik timurlaut-baratdaya dan serta sesar mendatar mengangan dengan arah barat baratlaut-timur tenggara. Witts dkk. (2015) melakukan interpretasi data anomali Bougeur residual di Kalimantan bagian timur, yang menunjukkan adanya kelurusan batuan alas barat baratlaut-timur tenggara yang terjadi pada Paleogen, namun diaktifkan kembali



Sumber : dimodifikasi Sapiie dan Rifiyanto (2017)

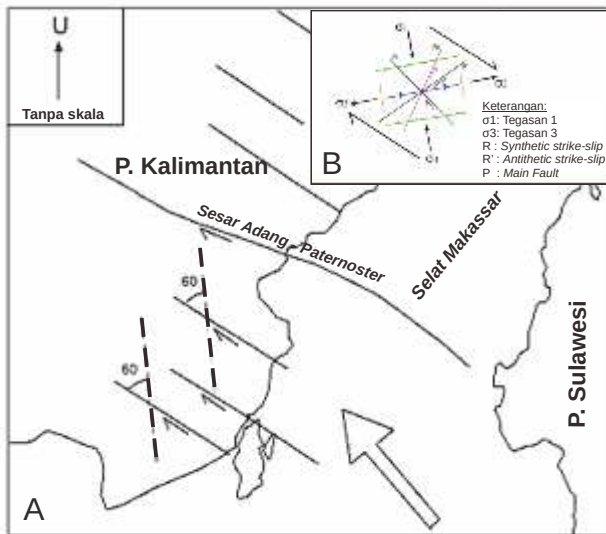
Gambar 14. Penampang geologi di daerah Kandangan yang berdekatan dengan daerah penelitian yang diinterpretasikan dari data seismik, data permukaan dan data bor, mengilustrasikan variasi model struktur bawah permukaan.

pada Miosen atau lebih muda. Gaya pengaktifan kembali (reaktifasi) dikaitkan dengan tumbukan Benua mikro Paternoster dan Benua Eurasia (Satyana dan Silitonga, 1994), yang menyebabkan kompresi baratlaut-tenggara dan mengakibatkan terangkatnya Ofiolit Meratus. Konsep gaya kompresi tersebut membentuk sesar, yang pembentukannya mengikuti model Moody and Hill (1956). Berdasarkan konsep tersebut, pola struktur di daerah penelitian dapat diinterpretasikan sebagai kelurusan barat baratlaut-timur tenggara membentuk sesar mendatar. Sistem sesar di Kalimantan Tenggara dicirikan oleh sesar mengangan barat baratlaut-timur tenggara, yang membentuk struktur geologi lebih kecil (orde ke-2) (Gambar 15). Selanjutnya, pola struktur geologi orde ke-2 ini mengikuti model struktur geologi Riedel Shear (Gambar 15). Berdasarkan analogi model ini, kelurusan membusur timurlaut-baratdaya diklasifikasikan sebagai sesar naik, kelurusan utara timurlaut-selatan baratdaya merupakan sesar mendatar mengiri (*antitethic Riedel*), kelurusan baratlaut-tenggara sebagai sesar normal, timur tenggara-barat baratdaya sebagai sesar mengangan, dan kelurusan lainnya merupakan kumpulan kelurusan kecil. Lipatan dengan sumbu timurlaut-baratdaya dapat dikenali sebagai bentukan topografi antiformal, dan dibatasi oleh sesar naik. Sesar utama yang berkembang di daerah penelitian diinterpretasikan sebagai sesar mendatar mengiri berarah utara timurlaut-selatan baratdaya.

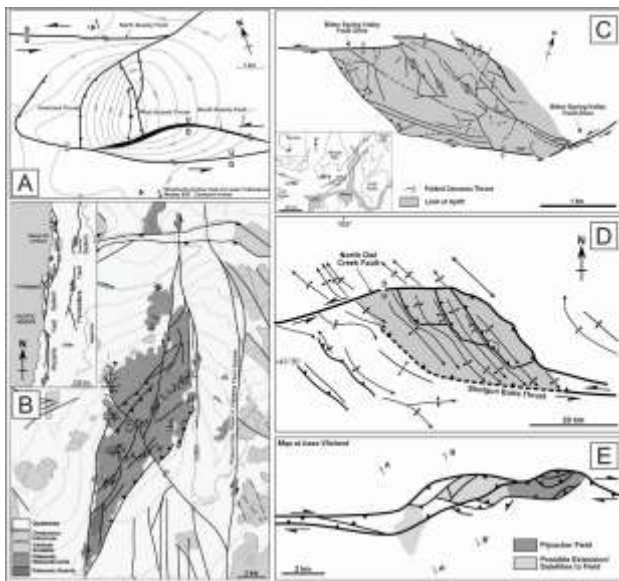
Geometri struktur permukaan di daerah penelitian, apabila dibandingkan dengan beberapa contoh di

daerah lain yang dipengaruhi oleh sistem sesar mendatar, secara spasial memiliki kemiripan. Struktur yang terbentuk memiliki arah orientasi umum timurlaut-baratdaya dengan pola membusur yang sejajar membentuk suatu jaringan kelurusan (*anostomosing lines*). Woodcock and Fischer (1986) menyebutkan bahwa kelurusan struktur dengan pola *anostomosing* atau *braided* dapat terjadi pada daerah yang dipengaruhi oleh gaya-gaya kopel dan membentuk suatu *shear zone*. Beberapa contoh tempat yang memiliki pola struktur tersebut diantaranya adalah: 1) *Echo Hills* di Nevada bagian selatan, 2) *Owl Creek Mountains* di Wyoming bagian tengah, 3) *Cerro de la Mica Atacama Fault System* di Chile bagian utara, 4) *Pijnacker Field* di Netherlands bagian barat, dan 5) *Quealy Dome, Wyoming* (McClay and Bonora, 2001) (Gambar 16).

Walaupun komparasi geometri struktur permukaan dengan model analog menunjukkan kemiripan yang tinggi, namun beberapa elemen pembentukannya masih belum dapat dikatakan sesuai. Misalnya, pola lekukan topografi yang terjadi sepertinya merupakan bentukan *left stepping*, yang seharusnya menghasilkan produk yang berkaitan dengan *releasing bend* dengan arah *Principal Displacement Zone* (PDZ) barat baratlaut-timur tenggara (Arisbaya dkk., 2016; Mann, 2007; Mukti dkk., 2016; Mukti, 2018b); namun yang terjadi di daerah ini adalah struktur antiformal yang mencerminkan produk dari sistem *restraining bend*, dengan arah PDZ timurlaut-baratdaya mengikuti arah umum Meratus (Mann, 2007; Mukti, 2018a). Selain hal tersebut, sesar-sesar naik yang mengapit *push-up ridge* di daerah ini belum memiliki validasi cukup rinci terkait komponen dengan arah pergerakan mendatar di bagian ujung kelurusan *step over*. Di beberapa lokasi ditemukan bukti-bukti sebagai sesar naik dan di tempat lainnya sebagai sesar *oblique*, serta indikasi sesar mendatar berupa *shear band*; namun secara menerus, terutama pada bagian tepi dari sistem *step over*, belum dijumpai bukti terperinci sebagai sesar mendatar yang dapat memenuhi konsep dari sistem *restraining bend* seperti komparasi geometri yang dilakukan dalam penelitian ini. Selanjutnya berdasarkan posisi stratigrafi dari formasi batuan sedimen Tersier di daerah penelitian yang merupakan punggung pengapit dari *push-up ridge*, umumnya memiliki kemiringan sama di bagian kedua sisinya, yaitu ke arah barat. Hal tersebut juga menunjukkan indikasi, bahwa morfo-struktur di daerah penelitian dapat dibentuk oleh perlipatan yang dibatasi oleh sesar-sesar naik yang bersifat duplex pada sistem *thrust belt* (Contreras and Suter, 1997; Mitra, 1986).



Gambar 15. (A) Sistem sesar di Kalimantan Tenggara dicirikan oleh sesar mengangan barat barat-laut-timur tenggara membentuk struktur geologi lebih kecil (orde ke-2). Pola orde 2 ini mengikuti model struktur *Riedel Shear* (Wiits *et al.*, 2015; Dimodifikasi). (B) Terminologi *Riedel shears*, pola struktur dalam suatu zona sesar, dikelompokkan dalam kategori berdasarkan arah dan jenisnya sebagai akibat dari deformasi *simple shear* (Twiss dan Moors, 1992).



Gambar 16. Beberapa tempat dengan pola struktur yang dipengaruhi oleh gaya-gaya kopel dan membentuk suatu *shear zone*. A) Quealy Dome, Wyoming; B) Cerro de la Mica Atacama Fault System di Chile bagian utara; C) Echo Hills di Nevada bagian selatan; D) Owl Creek Mountains di Wyoming bagian tengah; dan E) Pijnacker Field di Netherlands bagian barat (McClay and Bonora, 2001).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pola sebaran batuan di daerah Binuang dan Sekitarnya dapat diidentifikasi melalui *analisis band ratio* citra Landsat R:4/2, G:5/6 dan B:6/7; *Principal Component Analysis* FCC R: PC1, G: PC2 dan B: PC3. Pola struktur dikenali dengan baik melalui *Multi Map Raster Analysis* pada SRTM dan Radarsat. Geometri struktur utama permukaan memiliki tingkat korelasi tinggi dengan geometri pada model analog sistem sesar mendatar ($R=0,932$).

Pola struktur geologi di daerah Binuang dan sekitarnya ditunjukkan oleh geomorfologi asal struktur, membentuk zona perlipatan terdiri atas antiklin dan sinklin yang dibatasi oleh sesar naik yang juga memiliki arah pergerakan mendatar (*oblique*). Morfo-struktur ini menggambarkan pola struktur dengan mekanisme dipengaruhi oleh tegasan kompresional. Validasi elemen kekar pada formasi batuan Tersier, menunjukkan arah tegasan kompresional; dalam batuan pra-Tersier yang bersifat regangan. Hal tersebut mengindikasikan terjadinya reaktifasi pada struktur yang berkembang di daerah penelitian.

Geometri struktur permukaan dicirikan pada morfo-struktur, menunjukkan kesamaan dengan geometri struktur permukaan pada sistem sesar mendatar berupa *step over fault*; namun berdasarkan posisi stratigrafi dan kesamaan arah kemiringan perlapisan batuan, menunjukkan bahwa sesar-sesar tersebut merupakan suatu thrust duplex yang muncul di permukaan. Sayap barat Pegunungan Meratus yang disimpulkan sebagai *thrust mountain front* mungkin merupakan bentukan struktur lebih tua yang mengalami deformasi kembali; atau struktur yang tercermin dipermukaan merupakan variasi lain dari *thrust mountain belt*, mungkin berupa struktur *thrust-dominated restraining bends*.

Saran

Perlu penelitian lebih rinci mengenai bukti elemen struktur di lapangan, terutama di sepanjang jalur sesar utama yang membentuk *push-up ridge*, sebagai validasi dan bukti detail untuk dapat memastikan mekanisme pembentukan dari sistem sesar yang terjadi di daerah Binuang dan sekitarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Survei Geologi atas kesempatan dan dukungan pendanaan selama melaksanakan penelitian di daerah Binuang Provinsi Kalimantan Selatan. Ucapan

terimakasih disampaikan pula kepada Ir. Sigit Maryanto, M.Si atas kontribusi dalam pengumpulan sampel batuan dan analisis laboratorium yang dipergunakan dalam penelitian ini. Kepada Ir. Sidarto, M.Si penulis mengucapkan terimakasih atas diskusi dan saran selama melaksanakan kegiatan penelitian.

ACUAN

- Arisbaya, I., Mukti, M.M., Handayani, L., Permana, H., Schnabel, M., 2016. Tabuan-Panaitan Ridge, Trace of Sumatran Fault in the Sunda Strait based on Geophysical Data Analysis, in: *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Geoteknologi LIPI 2015*. Bandung, Indonesia, p. I-33-I-39.
- Bamler, R. and Wessling, 1999. *The SRTM Mission: A World-wide 30 m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days*. D. Fritsch & R. Spiller, (Eds). Photogrammetric Week '99. Wichmann Verlag, Heidelberg, 1999.
- Bon, J., Fraser, T.H., Amris, W., Stewart, D.N., Abubakar, Z., Sosromihardjo, S., 1996. A review of the exploration potential of the Paleocene Lower Tanjung Formation in the South Barito Basin. *Indonesian Petroleum Association, Proceedings 25th Annual Convention*, Jakarta. FA96-1.0-027, 1-11
- Burbank, D.W., and Anderson, R.S., 2001. *Tectonic geomorphology*. Blackwell Publishing. First published 2001. p.267.
- Contreras, J., Suter, M., 1997. A kinematic model for the formation of duplex systems with a perfectly planar roof thrust. *Journal Structure Geology*, 19, 269–278. doi:10.1016/S0191-8141(96)00095-8.
- Drury, S.A., 2001. *Image Interpretation in Geology*. Third edition, Nelson Thornes Publishing, Cheltenham, United Kingdom. p.279.
- Heryanto, R., 2010. *Geologi Cekungan Barito*. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Edisi I, p.141.
- Heryanto, R., Sutrisno, Sukardi, dan Agustiyanto, D.A., 1998. *Peta Geologi Lembar Belimbing skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Hill, D.P., 1982. Contemporary Block Tectonics: California and Nevada. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, vol 87. Issue B7.
- Jordan, G., 2003. Morphometric analysis and tectonic interpretation of digital terrain data: a case study. *Earth Surface Process. Land-forms* 28, 807-822.
- Kusumah, D.K., Jamal, dan Maryanto, S., 2016. *Peta Geologi Lembar Binuang (1712-63), skala 1:50.000*. Pusat Survei Geologi.
- Mann, P., 2007. Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems. *Geology Society London, Special Publication*, 290, 13–142. doi:10.1144/SP290.2
- Mathew, M.J., Menier, D., Siddiqui, N., Kumar, G.S., Authemayou, C., 2016. Active Tectonic Deformation Along Rejuvenated Faults in Tropical Borneo: Inferences Obtained From Tectono-Geomorphic Evaluation. *Geomorphology* 267 (2016) 1-15. Elsevier.
- McClay, K., Doodley, T., Fergusson, A., Poblet, J., 2000. Tectonic Evolution of the Sanga Sanga Block, Mahakam Delta, Kalimantan, Indonesia. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologist*, v.84, no.6, pp.765-786.
- McClay, K., and Bonora, M., 2001. Analog Models of Restraining Stepovers in Strike-Slip Fault Systems. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologist*, v.85, no.2, pp.233-260.

-
- Mitra, S., 1986. Duplex structures and imbricate thrust system: Geometry, structural position, and hydrocarbon potential. *American Association Petroleum Geology Bulletin*.
- Moody, J.D., and Hill, M.J., 1956. Wrench Fault Tectonics. *American Association Petroleum Geology Bulletin*, 67, 1207-1246.
- Mukti, M., Singh, S., Arisbaya, I., Deighton, I., Handayani, L., Permana, H., Schnabel, M., 2016. Geodynamics of Sunda Strait forearc based on seismic reflection data, *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Geoteknologi LIPI 2015*.
- Mukti, M.M., 2018a. Structural complexity in the boundary of forearc basin–accretionary wedge in the northwesternmost Sunda active margin. *Bulletin Marine Geology* 33, 1–14.
- Mukti, M.M., 2018b. Structural style and depositional history of the Semangko pull-apart basin in the southeastern segment of Sumatra Fault Zone. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 28, 115–128.
- Mwaniki, M.W., Moeller, M.S., and Schellmann, G., 2015. A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualising lineaments: A case study of central region Kenya. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W3, 2015.
- Sapiie, B., and Rifiyanto, A., 2017. Tectonics and Geological Factors Controlling Cleat Development in the Barito Basin, Indonesia. *Journal Engineering Technology and Science*, Vol. 49, No. 3, 2017, 322-339.
- Satyana, A.H., and Silitonga, P.D., 1994. Tectonic reversal in East Barito Basin, South Kalimantan: Consideration of the types of inversion structures and petroleum significance. *Indonesian Petroleum Association, Proceedings 23th Annual Convention*, Jakarta. IPA-94-1.1-027.
- Sidarto, 2010. *Perkembangan Teknologi Inderaan Jauh dan Pemanfaatannya untuk Geologi di Indonesia*. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Edisi I, p.85.
- Sikumbang, N., 1986. Geology and Tectonics of Pre-Tertiary rocks in the Meratus Mountains South- East Kalimantan, Indonesia. Ph.D Thesis, University of London.
- Sikumbang, N., dan Heryanto, R., 2009. *Peta Geologi Lembar Banjarmasin, Kalimantan, skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Simon, N., Ali, C.A., Mohamed, K.R., and Sharir, K., 2016. Best Band Ratio Combinations for the Lithological Discrimination of the Dayang Bunting and Tuba Islands, Langkawi, Malaysia. *Sains Malaysiana*, 45(5)(2016): 659–667.
- Sukiyah, E., 2017. *Sistem Informasi Geografis: Konsep dan aplikasinya dalam analisis geomorfologi kuantitatif*. Unpad Press. Edisi 1, xxvi, p.296.
- Twiss, R.J. and Moore, E.M., 1992. *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company, New York.
- Van Zuidam, R.A., 1985. Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*. Smith Publishers. The Hague, The Netherlands. p.441.
- Witts, D., Davies, L., Morley, R., 2014. Uplift of the Meratus Complex: Sedimentology, biostratigraphy, provenance and structure. *Proceedings Indonesian Petroleum Association 38th Annual Convention*. IPA14-G-082.
- Witts, D., Davies, L., Morley, R., Anderson, L., 2015. Neogene deformation of East Kalimantan: A regional perspective. *Proceedings Indonesian Petroleum Association 39th Annual Convention*. IPA15-G-246.
- Woodcock, N.H. and Fischer, M., 1986. Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, 8(7), p.725-735
- Yusuf, A.S., Ismawan, dan Helmi, F., 2015. Evolusi Tektonik Berdasarkan Analisis Data Kekar Daerah Binuang Dan Sekitarnya, Kecamatan Binuang, Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan. *Bulletin of Scientific Contribution : Geology*. Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran. Vol 12, no 3 (2014).
-