



Periode Deformasi Kenozoikum Kepulauan Aru, Cekungan Wokam, Maluku

Cenozoic Deformation Period of Aru Islands, Wokam Basin, Maluku

Iwan Sukma Gumilar

Pusat Survei Geologi
Jalan Diponegoro No.57 Bandung 40112
Email : iwangumilar79@gmail.com

Naskah diterima : 16 Maret 2017, Revisi terakhir : 22 Mei 2017, Disetujui : 23 Mei 2017, Online : 30 Mei 2017

Abstrak - Penelitian struktur geologi untuk menentukan periode deformasi Kenozoikum di daerah Kepulauan Aru, Cekungan Wokam, Maluku telah dilakukan. Penentuan periode deformasi dilakukan dengan mengelompokkan pola kelurusan struktur dan analisis *stress tensor* dari hasil pengukuran bidang-bidang kekar dan gores-garis yang diukur di lapangan. Rekonstruksi umur struktur yang berkembang direkonstruksi dari hubungan stratigrafi batuan yang terdeformasi. Pada Kenozoikum, telah terjadi tiga tahapan periode deformasi yang masing-masing tahapan mempunyai karakteristik dan struktur geologi yang berbeda. Periode deformasi pertama dimulai pada Miosen Akhir setelah Formasi Koba diendapkan, dengan tegasan utama berarah relatif barat-laut-tenggara dengan *stress tensor* bersifat *pure strike-slip*. Periode deformasi kedua terjadi setelah Formasi Manumbai diendapkan pada Plistosen Akhir dengan gaya ekstensional berkembang sangat dominan dan menghasilkan sesar normal sebagai reaktifasi dari sesar-sesar tua. Periode deformasi ketiga terjadi ketika Holosen, yang menghasilkan kelurusan hampir utara-selatan.

Kata Kunci : deformasi, Kenozoikum, struktur geologi, Kepulauan Aru.

Abstract - Research on structural geology to determine deformation periods at the Aru Islands of Wokam Basin, Maluku have been done. Determining the deformation periods are approached by grouping the lineament structure and stress tensor analysis of bedding, joints, slicken side data which collected during fieldwork. The age of structural geology which formed at these area are reconstructed from stratigraphic relationship of deformed rocks. At Cenozoic, the deformation of Aru Islands, Maluku can be divided into three main periods which have different characteristic and geological structures pattern. The first period were started at Late Miocene where the Koba Formation had been deposited, the main stress direction was Northwest-Southeast and the stress tensor tend to pure strike-slip. The second period occurred after Manumbai Formation were deposited at Late Pleistocene, the main stress was extensional and yielded normal faults as fault reactivation. At B the third period take place and generated North-South structural lineations.

Keywords : deformation, Cenozoic, geological structures, Aru Islands.

PENDAHULUAN

Dalam dekade ini, produksi minyak dan gas bumi di Indonesia cenderung menurun, sementara itu kebutuhan energi ini terus meningkat. Untuk mendongkrak angka produksi migas, maka perlu dilakukan eksplorasi yang menerus dan sistematis. Daerah yang pada awalnya dianggap tidak prospek, namun dengan berkembangnya teknologi dan pengetahuan di daerah tersebut diharapkan dapat menjadi daerah prospek untuk produksi sumberdaya minyak dan gas bumi (Direktorat Jendral Minyak dan Gas Bumi, 2015). Penelitian geologi yang mencakup aspek geologi struktur dan periode deformasi akan menambah nilai tambah suatu wilayah kerja ketika akan ditawarkan oleh Ditjen Migas kepada para investor. Informasi periode deformasi ini adalah informasi awal yang pemanfaatannya akan berguna untuk menentukan sistem perangkap dimana hidrokarbon dapat terakumulasi.

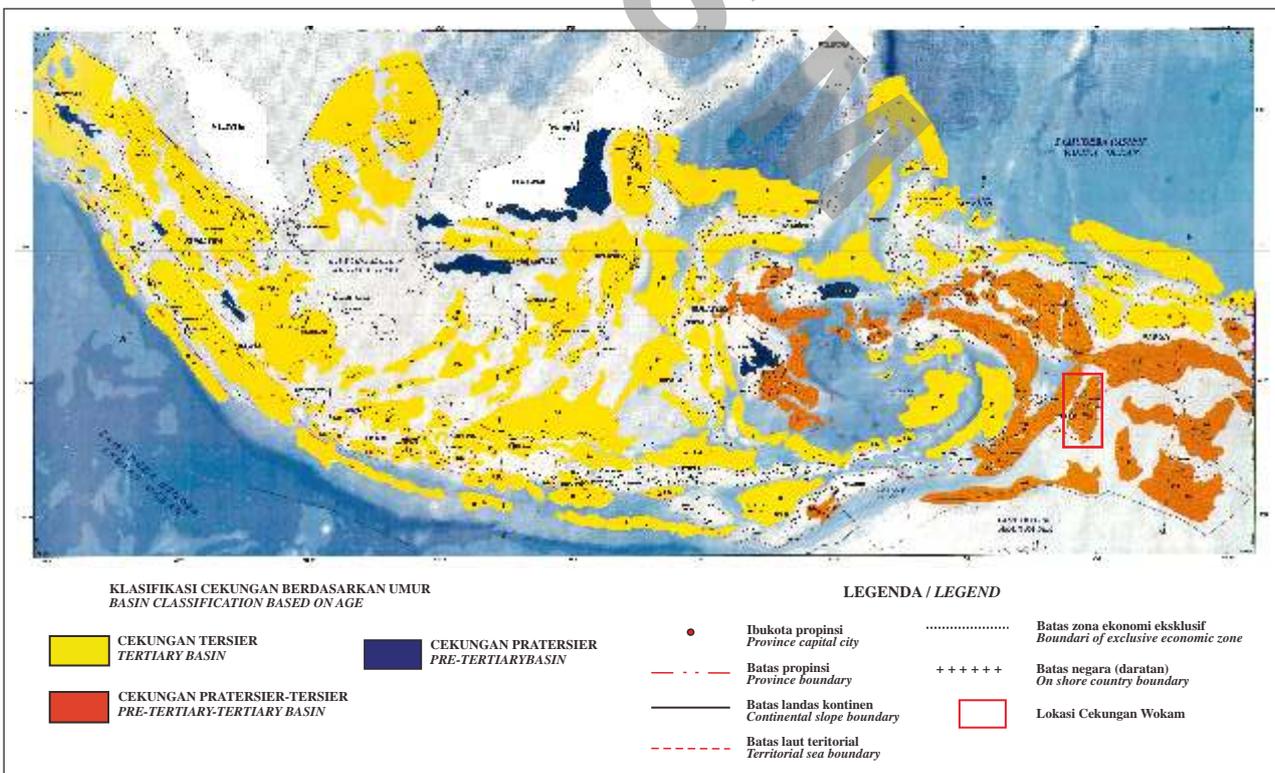
Kepulauan Aru yang termasuk ke dalam Cekungan Wokam, secara geografi termasuk salah satu kepulauan terpencil di Indonesia, namun dalam rangka eksplorasi migas, daerah ini dilakukan penelitian geologi yang lebih rinci. Berdasarkan Peta Cekungan Sedimen Indonesia (Badan Geologi, 2009), Kepulauan Aru merupakan kepulauan di dalam Cekungan Wokam.

Cekungan ini adalah cekungan *passive margin* berumur Kenozoikum (Gambar 1) yang diduga prospek terhadap kandungan migas. Secara tektonik, posisi cekungan ini termasuk ke dalam daratan Benua Australia yang berada pada paparan Arafura relatif stabil dan dibatasi oleh Sesar naik *Timor-Tanimbar Through* di bagian timurnya, Zona ekstensi *Aru Through* di bagian baratlaut, dan sesar mendatar *Tarera-Aiduna* dan *Central Ranges Papua Fold belts* di bagian utaranya (Charlton 2000, 2001).

Kepulauan Aru terletak di selatan Pulau Papua, secara administrasi termasuk kedalam Kabupaten Kepulauan Aru, Propinsi Maluku (Gambar 2). Tulisan ini akan membahas evolusi tektonik Kepulauan Aru pada Kenozoikum berdasarkan data struktur geologi yang diperoleh selama kegiatan lapangan. Penelitian ini bermaksud untuk merekonstruksi periode deformasi pada masa Kenozoikum di Kepulauan Aru yang dapat digunakan dalam studi eksplorasi potensi sumberdaya migas di daerah-daerah *frontier*.

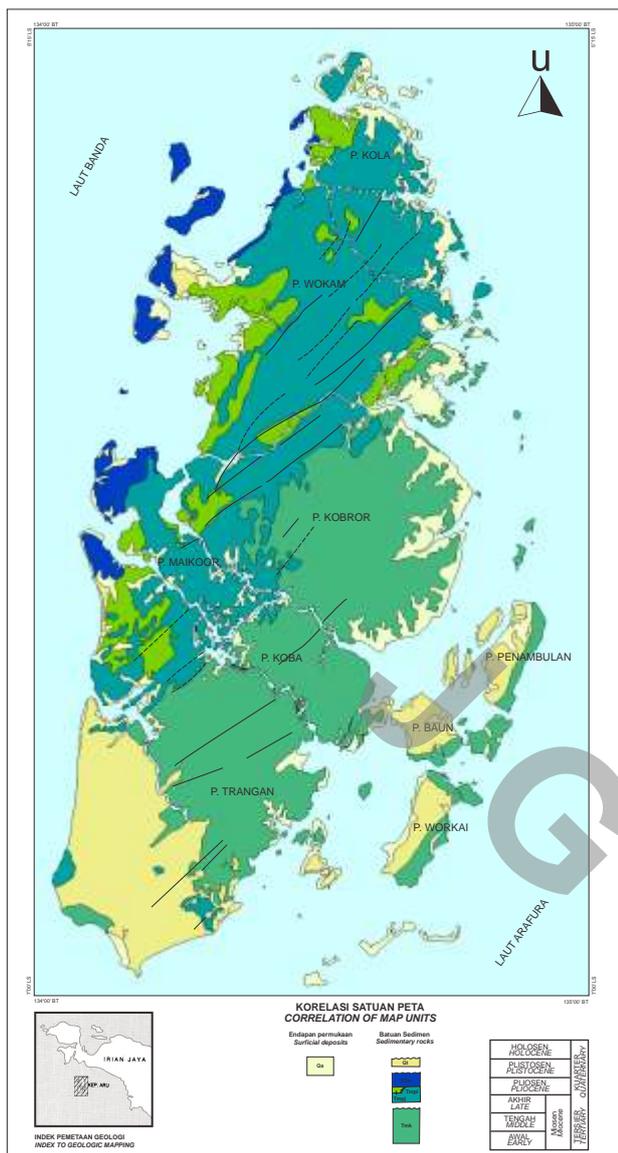
GEOLOGI REGIONAL

Tektonik Wilayah Indonesia Timur adalah sangat kompleks, karena merupakan tumbukan antara tiga lempeng yaitu: Lempeng Benua Eurasia, Australia dan Lempeng Samudera Pasifik-Filipina. Berdasarkan pada



Sumber : Badan Geologi (2009)

Gambar 1. Peta Cekungan Sedimen Indonesia



Sumber : Hartono dan Ratman, (1992)

Gambar 2. Peta Geologi Kepulauan Aru

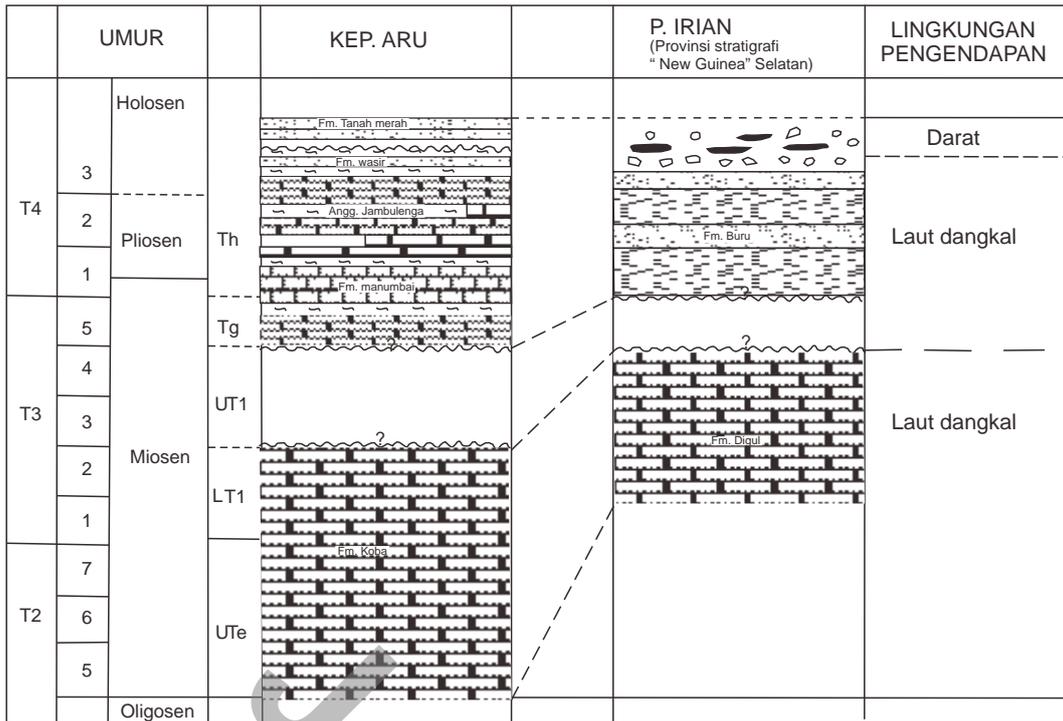
korelasi fosil-fosil berumur Mesozoikum yang banyak ditemukan di Kepulauan Indonesia Timur, banyak pulau di wilayah ini, seperti Buru, Seram, Banggai-Sula, Timor dan Pulau Buton merupakan pecahan-pecahan benua hasil proses pemekaran (*rifting*) di bagian utara Australia (Pigram and Panggabean, 1984; Hall, 1995; Charlton, 2001). Lain halnya dengan Cekungan Wokam yang terletak di bagian tepi Daratan Benua Australia, secara geologi merupakan daerah relatif lebih stabil. Berdasarkan data gayaberat dan geomagnet di bagian selatan dari cekungan merupakan paparan Depresi Arafura, dan bagian utaranya adalah Palung Aru (Padmawidjaya dan Subagyo, 2014).

Van Ufford dan Cloos (2005) menyebutkan bahwa Papua sangat dipengaruhi oleh dua kejadian tektonik

utama yaitu pembentukan pegunungan dan erosi yang berkaitan dengan tumbukan busur benua di mana bagian utaranya adalah zona subduksi dengan kemiringan ke arah utara. Proses tektonik pembentukan pegunungan berpengaruh di bagian utara pulau Papua dan menghasilkan sumber batuan sedimen yang kemudian banyak diendapkan di Palung Aru. Sedangkan proses tektonik kedua yang terjadi pada Oligosen dimana terjadi penurunan muka air laut sekitar 90 meter dan diikuti fase kompresi yang diakibatkan oleh tumbukan antara Lempeng Samudera Pasifik dan Lempeng Benua Australia. Fase ini menghasilkan *fold belt* dan patahan yang merupakan perangkat potensial bagi terakumulasinya hidrokarbon (Hall, 1995; van Ufford and Cloos, 2005; Alda and Kim, 2008; Granath, *et al.*, 2010).

Paparan Arafuru bersama dengan dataran selatan Papua adalah blok yang mempunyai arah timurlaut-baratdaya yang umumnya berasosiasi dengan sesar normal dan sesar oblik, sebagai sisa-sisa lempeng benua Australia di bagian selatannya. Sedangkan Palung Aru adalah hasil kegiatan tektonik yang lebih muda dimana batas barat dari paparan Aru tersubduksi ke bagian bawah Busur Banda yang terjadi pada Plio-Plistosen yang menghasilkan busur vulkanik Banda. Di bagian utara Laut Arafura, paparan Arafura yang berumur pra Kenozoikum mengalami penunjaman di bagian bawah Palung Aru (Alda dan Kim, 2008).

Menurut Hartono dan Ratman (1992), batuan yang tersingkap di Kepulauan Aru terdiri atas Formasi Koba, Formasi Menumbai, Anggota Jambulenga Formasi Manumbai, Formasi Wasir, Formasi Tanah merah dan ditindih secara tidak selaras oleh Aluvium. Formasi Koba yang berumur Miosen Awal-Miosen Tengah di Kepulauan Aru dapat dibandingkan dengan Formasi Digul di Pulau Papua yang tersusun oleh batugamping dan napal dan diendapkan pada lingkungan laut dangkal. Terjadi penurunan muka air laut yang diakibatkan oleh proses glasiasi yang mencapai puncaknya pada Miosen Akhir (Davies, 2012), hal ini masih berlanjut hingga Plistosen yang mengakibatkan Kepulauan Aru dan Daratan Papua bersatu (Amri, *et al.*, 2015), sehingga Formasi Menumbai, Anggota Jambulenga Formasi Manumbai, Formasi Wasir dan Formasi Tanah Merah di Kepulauan Aru yang diendapkan di lingkungan laut dangkal sampai darat dapat dibandingkan dengan Formasi Burudi Pulau Papua yang tersusun oleh batupasir dan batulumpur karbonan berselang seling dengan batugamping mikrit yang berumur Miosen Akhir sampai Plistosen (Gambar 3).



Sumber : Hartono dan Ratman, 1992

Gambar 3. Korelasi stratigrafi Kepulauan Aru dan Pulau Papua

DATA DAN METODE PENELITIAN

Penelitian evolusi tektonik Kenozoikum di Kepulauan Aru, Cekungan Wokam, diawali dengan menganalisis citra DEM (*Digital Elevation Model*) yang berasal dari data SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) yaitu data topografi digital resolusi tinggi, yang menggambarkan topografi atau bentuk ketinggian di suatu daerah yang kemudian dianalisis bentuk dan pola kelurusannya. Selain itu, data geologi struktur berupa jurus dan kemiringan lapisan batuan, bidang kekar dan bidang gores-garis juga diamati pada singkapan batuan.

Penentuan periode deformasi ini diawali dengan mengelompokkan pola-pola kelurusan dan mengamati umurnya berdasarkan prinsip kelurusan yang lebih muda akan memotong kelurusan yang lebih tua, kemudian kelompok kelurusan ini disusun umurnya dari tua ke muda. Selain itu, penulis menggunakan program TENSOR (Delvaux, D., dan Sperner., 2003) untuk menentukan arah gaya yang berkembang pada saat terbentuknya struktur-struktur *brittle* dan jenis *stress tensor*-nya. Data yang digunakan pada program ini adalah data struktur *brittle* seperti halnya kekar dan gores garis. Pada pengambilan data lapangan, data kekar dapat diamati dengan lebih baik dibandingkan data gores garis yang umumnya lebih sulit untuk didapatkan di lapangan.

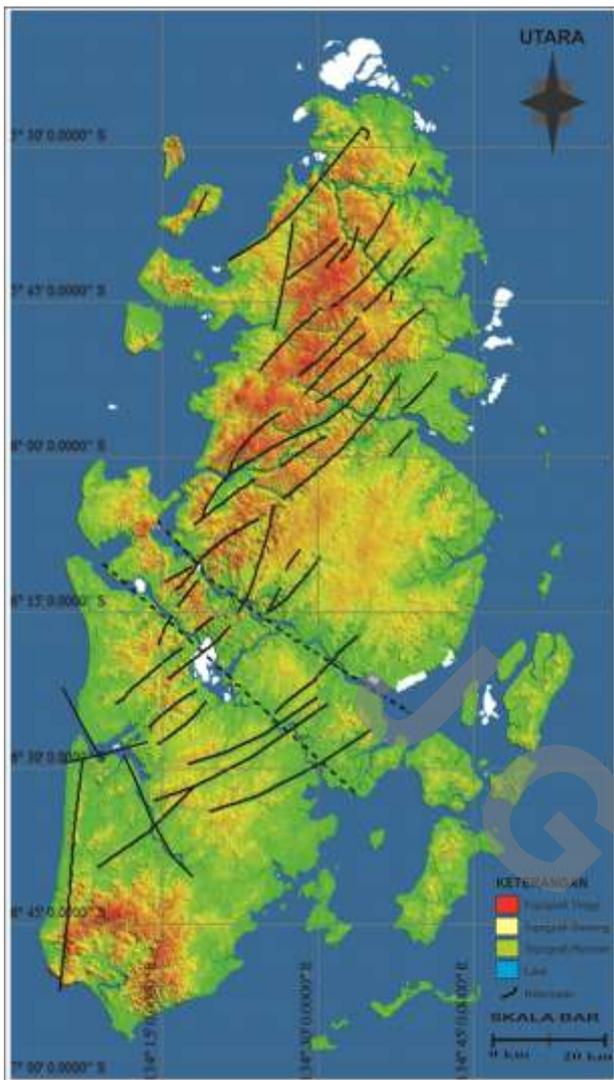
HASIL DAN ANALISIS

Interpretasi Citra DEM

Analisis struktur geologi dengan menggunakan citra DEM yang dibandingkan dengan Peta Geologi Lembar (Hartono dan Ratman, 1992) telah menghasilkan pola struktur hasil interpretasi Kepulauan Aru, Maluku (Gambar 4). Pola ini akan membantu untuk memperkirakan arah tegasan utama dan mekanisme tektonik daerah ini.

Pola struktur hasil interpretasi ini kemudian dituangkan dalam diagram roset yang hasilnya menunjukkan distribusi arah dan frekwensi kelurusan (Gambar 5). Pengukuran arah kelurusan di daerah ini berjumlah 355 dan hasil pengeplotan arah kelurusan ke dalam diagram roset yang paling dominan adalah berarah U040°-060°T-U220°-240°T dengan populasi 25,2%, namun secara umum dapat dikelompokkan menjadi 3, yaitu Kelompok Kelurusan A (U50° T – U230°T), Kelompok Kelurusan B (U130°T – U310° T), dan Kelompok Kelurusan C (U10°T – U(190°T) (Tabel 1).

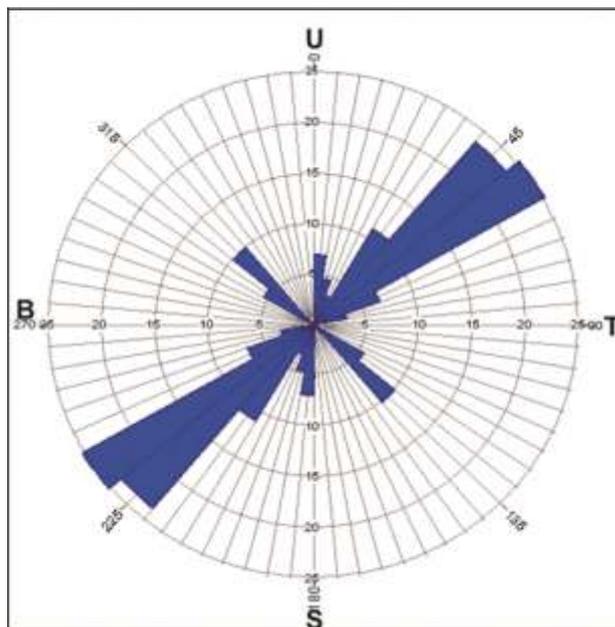
Berdasarkan hubungan pola kelurusan yang saling memotong, kelompok kelurusan diatas dapat diketahui urutan peristiwa tektoniknya. Pola kelurusan A, berarah U050° T – U230° T ini dominan di bagian barat daerah penelitian, dengan panjang bervariasi dari 5 (lima) km sampai 50 km.



Gambar 4. Peta Hasil Interpretasi Citra DEM yang menunjukkan pola kelurusan di Kepulauan Aru, Cekungan Wokam, Maluku

Pola kelurusan tersebut bisa diselusuri mengikuti pola punggungan yang terlihat pada citra DEM. Pola seperti ini umumnya berasosiasi dengan sesar yang mempunyai arah pergerakan horisontal (*strike-slip movement*) atau bidang perlapisan batuan. Pola kelurusan ini dipotong oleh pola kelurusan B dan C yang lebih pendek. Hal ini menunjukkan bahwa pola struktur A ini diperkirakan relatif lebih tua di dibandingkan dengan pola struktur B dan C.

Pola kelurusan B berarah U130° T – U310° T, yang umumnya berkembang di bagian barat daerah penelitian, dengan panjang yang bervariasi antara 5 (lima) km sampai 30 km. Pola kelurusan ini mengikuti kelurusan sungai (selat) dan lembah yang terlihat pada citra DEM. Pola ini dipotong oleh pola struktur C yang lebih muda dan diperkirakan berasosiasi dengan pola



Gambar 5. Diagram roset yang menunjukkan kelompok arah kelurusan maksimum yang berarah U040°-060°T, sampai minimum yang berarah U10°T.

Tabel 1. Kelompok kelurusan berdasarkan frekwensi pada roset diagram hasil interpretasi citra DEM di daerah Kepulauan Aru, Cekungan Wokam, Maluku.

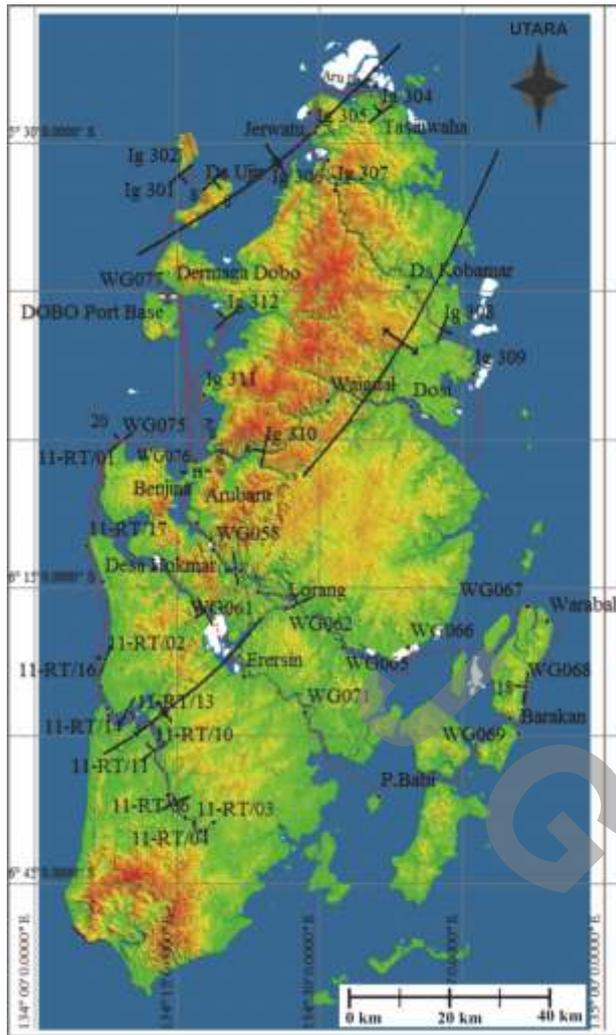
Kelompok	Mode	Kisaran	Nilai
A	U050°T – U230°T	(030-060) – (210-240)	Maksimum
B	U130°T – U310°T	(120-140) – (300-320)	Sub Maksimum
C	U010°T – U190°T	(000-020) – (180-200)	Minimum

pergerakan dominan horisontal (*strike-slip movement*) dan atau mekanisme peregangan (*extension*).

Pola kelurusan C yang berarah U010° T - U190° T berkembang hampir di semua bagian utara dan tengah daerah penelitian, dengan panjang berkisar antara 10 km sampai dengan 30 km. Pada citra DEM terlihat sebagai kelurusan yang memotong punggungan dan kelurusan sungai yang mengakibatkan pembelokan secara tiba-tiba.

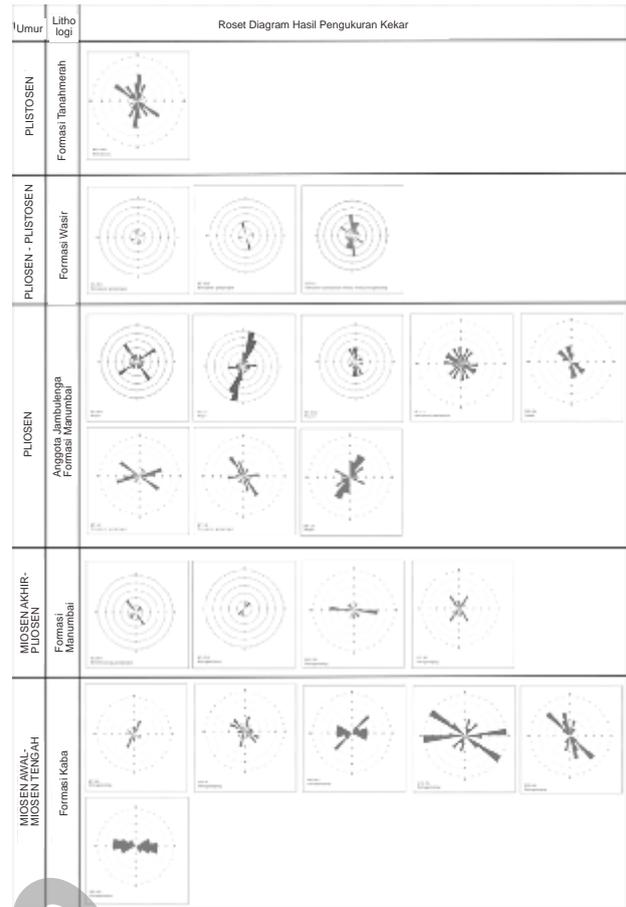
Analisis Arah Umum dan Tegasan Utama Bidang Kekar

Pengukuran bidang kekar pada setiap formasi batuan di Kepulauan Aru, Cekungan Wokam telah dilakukan dimana lokasi pengukuran ditampilkan pada (Gambar 6) dan data pengukuran bidang kekar ditampilkan pada Lampiran 1. Data ini kemudian ditampilkan pada diagram roset untuk mengetahui pola arah bidang kekar di setiap formasi (Gambar 7). Berdasarkan pola ini, dapat diperkirakan arah umum kekar dan kelurusan di setiap formasi.



Gambar 6. Peta lintasan dan lokasi pengamatan kekar di daerah penelitian.

Formasi Koba adalah kelompok batuan sedimen tertua yang tersingkap di daerah Kepulauan Aru, Cekungan Wokam. Formasi ini diperkirakan berumur Miosen Awal - Miosen Tengah, yang tersusun oleh kalkarenit dan napal. Sebagai batuan berumur paling tua di daerah ini, Formasi Koba telah mengalami deformasi yang lebih kompleks dibandingkan dengan formasi batuan lainnya. Hal ini ditunjukkan pada pola umum arah kekar yang sangat bervariasi. Pola umum arah kekar yang berkembang di satuan ini berarah baratlaut-tenggara, barat-timur, utara baratlaut-selatan tenggara dan sebagian hampir utara timurlaut- selatan baratdaya. Arah utama kekar yang berarah baratlaut – tenggara tampak di lokasi 11/RT/006 dan 11/WG/071 dengan arah $U300^{\circ}T$ sampai $U310^{\circ}T$. Di lokasi 11/WG/063 dan 11/WG/065 tampak pola kekar berarah $U260^{\circ}T$ sampai $U280^{\circ}T$ yang berarah relatif barat-timur. Sedangkan pada arah kelurusan minor, seperti utara baratlaut-



Gambar 7. Hasil pengeplotan data bidang kekar pada diagram roset untuk mengetahui arah umum dan pola struktur di setiap formasi batuan di Kepulauan Aru, Maluku.

selatan tenggara dan utara timurlaut-selatan baratdaya tampak pada pengukuran kekar di lokasi 11/WG/066 dan 11/RT/06 (Gambar 7).

Formasi Manumbai berumur Miosen Akhir-Pliosen dan terusun oleh batugamping *coquina* kaya akan fosil moluska dan koral. Kekar tidak berkembang dengan baik di dalam formasi ini, kemungkinan diakibatkan oleh komposisi batugamping yang banyak mengandung fosil berukuran mikro sampai makro.

Arah struktur kekar yang berkembang di formasi ini adalah barat-timur yang tampak pada pengukuran di lokasi 11/WG/059 dan baratlaut-tenggara, seperti yang ditunjukkan pada pengukuran kekar di lokasi 11/IG/304 dan 11/WG/60. Selain itu, berkembang pula kekar dengan frekuensi yang lebih rendah, dengan arah timurlaut - baratdaya yang ditunjukkan oleh seluruh hasil pengukuran kekar di formasi ini (Gambar 7).

Anggota Jambulenga Formasi Manumbai, terusun oleh napal dan diperkirakan berumur Pliosen.

Kekar berkembang sangat baik pada satuan napal ini (Gambar 8), sehingga rekaman data kekar di formasi ini cukup banyak yaitu sebanyak 8 (delapan) lokasi pengukuran. Arah umum kekar di formasi ini adalah utara timurlaut-selatan baratdaya seperti yang ditunjukkan pada hasil pengukuran di lokasi 11/IG/311 dan 11/RT/14, kemudian diikuti oleh kekar yang berarah baratlaut-tenggara pada pengukuran di lokasi 11/IG/305, 11/RT/12, 11/RT/10, 11/RT/13 dan 11/RT/14. Sedangkan kekar berarah relatif barat-timur tampak di hampir semua lokasi pengukuran, walaupun dengan frekuensi yang cukup rendah (Gambar 7).

Formasi Wasir berumur Pliosen-Plistosen disusun oleh napal, batulumpur gampingan dan batupasir gampingan. Satuan batuan ini menempati disebelah barat daerah penelitian. Berdasarkan pengukuran kekar yang dilakukan di 3 (tiga) titik yang mewakili, tampak pola utama yaitu berarah U350T sampai U360T di lokasi 11/RT/01 dan 11/IG/303, kemudian diikuti oleh kekar yang berarah utara baratlaut-selatan baratdaya yang tampak di lokasi pengukuran 11/RT/01, dan kekar yang berarah baratlaut-tenggara berkembang pula dengan frekuensi yang minor di lokasi 11/RT/01 (Gambar 7).

Gambar 8 A) Kekar yang berkembang pada Anggota Jambulenga Formasi Manumbai di Lokasi 11/IG/305, kekar yang berkembang terutama berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. B) Singkapan Anggota Jambulenga Formasi Manumbai di lokasi 11/WG/056. Satuan napal kelabu terang kecoklatan, konkoidal, massif, sebagian menyerpih, tertindih lumpur, lempung aluvial. Tersingkap di muara anak sungai di S. Workai, daerah Benjina.

Formasi Tanah Merah berumur Plistosen dan tersusun oleh batupasir kuarsa dan menempati bagian selatan Kepulauan Aru. Struktur kekar berkembang sangat buruk di formasi ini, sehingga hanya dapat dilakukan pengukuran di satu lokasi yaitu di 11/WG/67 dengan kekar terutama berarah hampir utara-selatan dan baratlaut-tenggara (Gambar 7).

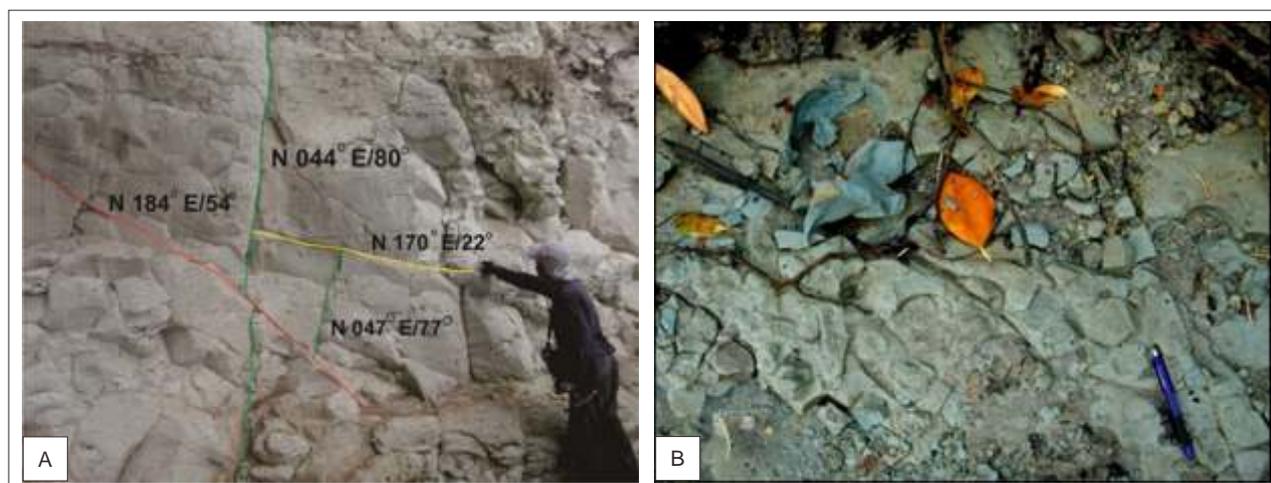
DISKUSI

Kelompok Kelurusan dan Sesar

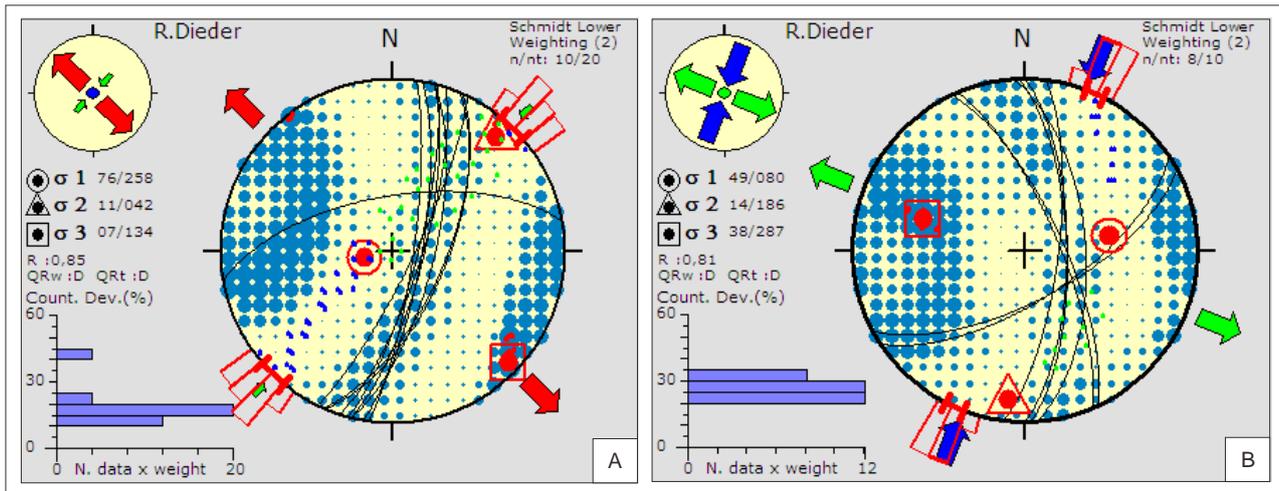
Berdasarkan hasil analisis citraDEM didapatkan 3 (tiga) kelompok kelurusan yaitu: Kelompok Kelurusan A dengan arah $U50^{\circ}T - U230^{\circ}T$, Kelompok Kelurusan B dengan arah $U130^{\circ}T - U310^{\circ}T$, dan Kelompok Kelurusan C dengan arah $U10^{\circ}T - U190^{\circ}T$.

Untuk mengetahui struktur apa saja yang berkembang pada masing-masing kelompok kelurusan, maka mode kelurusan ini dibandingkan dengan hasil analisis pengukuran bidang kekar agar diketahui kedudukan tegasan utama dan jenis *stress tensor*-nya (Delvaux dan Sperner, 2003) seperti pada (Gambar 9).

Kelurusan kelompok A, dominan berkembang di bagian barat daerah penelitian, dengan arah $U050^{\circ}T - U230^{\circ}T$, dan panjang yang bervariasi dari 5 (lima) km sampai dengan 50 km. Pola ini, umumnya berasosiasi dengan struktur yang mempunyai arah pergerakan horisontal (*strike-slip movement*) atau sumbu-sumbu lipatan. Lipatan yang terbentuk yaitu: Sinklin Jerwatu, Antiklin Kobamar dan Sinklin Sarwatu, sedangkan sesar yang terbentuk adalah: Sesar Manumbai dengan pergerakan normal, Sesar Maikor dan Sesar Sarwatu dengan pergerakan mendatar.



Gambar 8. A) Kekar yang berkembang pada Anggota Jambulenga Formasi Manumbai di Lokasi 11/IG/305, kekar yang berkembang terutama berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. B) Singkapan Anggota Jambulenga Formasi Manumbai di lokasi 11/WG/056.



Gambar 9. Contoh hasil analisis bidang kekar untuk mengetahui kedudukan tegasan utama (σ_1), (σ_2) dan (σ_3) dan jenis *stress tensor* yang dominan. (A) adalah hasil analisis bidang kekar di lokasi 11/IG/311 dengan *stress tensor* jenis *extensional*. (B) adalah hasil analisis bidang kekar di lokasi 11/IG/312 dengan *stress tensor* jenis *pure strike-slip*.

Struktur geologi tersebut diatas umumnya mempengaruhi batuan setelah pengendapan Formasi Manumbai yang berumur Plistosen. Maka struktur ini diperkirakan adalah Plistosen Akhir.

Kelurusan Kelompok B, umumnya berkembang di sebelah barat daerah penelitian, dengan panjang yang bervariasi antara 5 (lima) km sampai dengan 30 km, dengan arah $U130^\circ T - U310^\circ T$. Pola kelurusan ini mengikuti kelurusan sungai (selat) dan lembah yang tampak pada citra DEM dan berasosiasi dengan jenis struktur yang bersifat bukaan atau ekstensional, yang merupakan kelanjutan dari periode tektonik sebelumnya. Fase bukaan ini menyebabkan Kepulauan Aru terbelah oleh selat yang relatif menunjukkan arah seragam yaitu sekitar $U120^\circ T - U140^\circ T$, yaitu Selat Sarwatu, Selat Maikor dan Selat Workai.

Kelurusan kelompok C, berkembang hampir di semua bagian utara dan tengah daerah penelitian, dengan panjang berkisar antara 10 km sampai dengan 30 km dan arah $U010^\circ T - U190^\circ T$. Pola struktur yang berkembang sangat sulit diidentifikasi, hal ini dikarenakan kekar-kekar yang terbentuk pada batugamping terlarutkan oleh air, namun jejaknya masih dapat diidentifikasi pada citra DEM yang memotong batuan yang berumur Plistosen Akhir (Formasi Tanah Merah), sehingga struktur ini diperkirakan terbentuk pada Holosen.

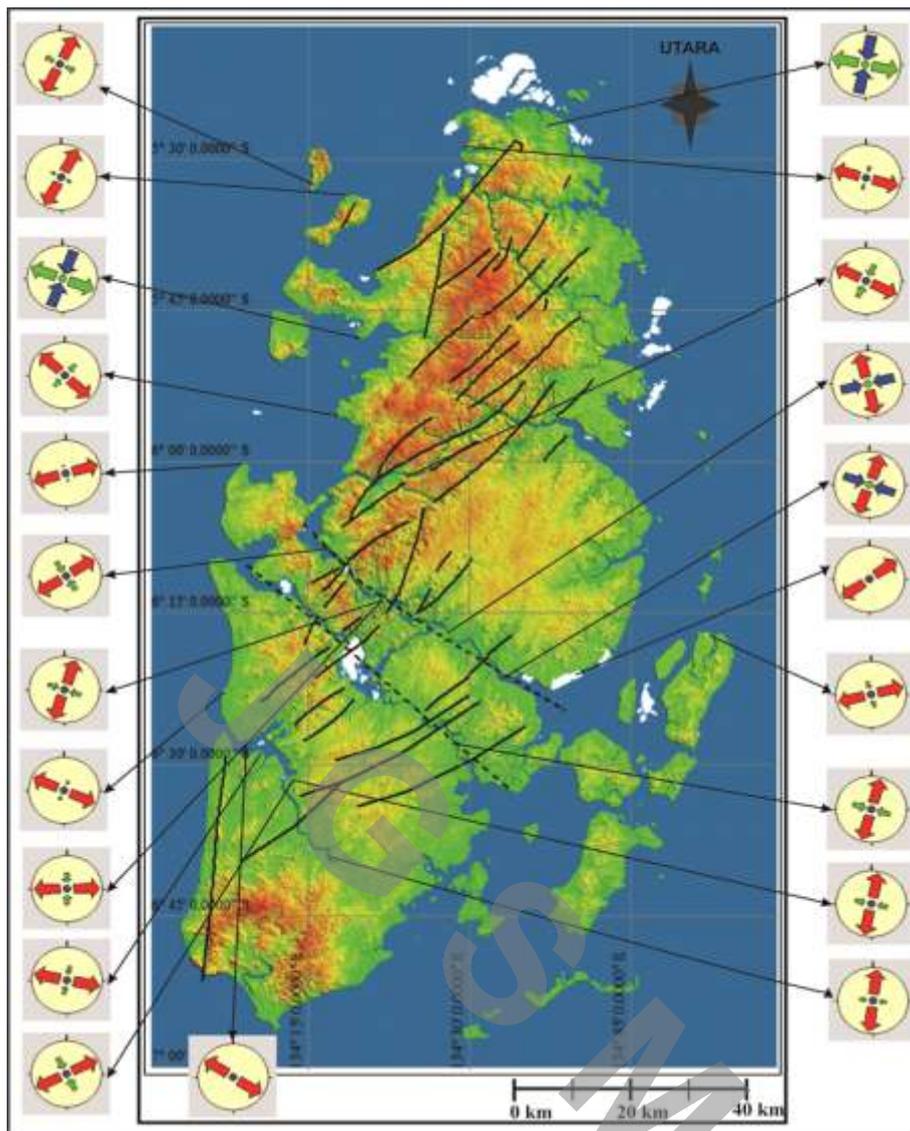
Sesar dan Tektonika

Membahas tektonika daerah penelitian, penulis hanya menggunakan hasil analisis bidang kekar yang sifat arah tegasannya regional. Hasil analisis *stress tensor* pada setiap lokasi pengamatan ditampilkan pada

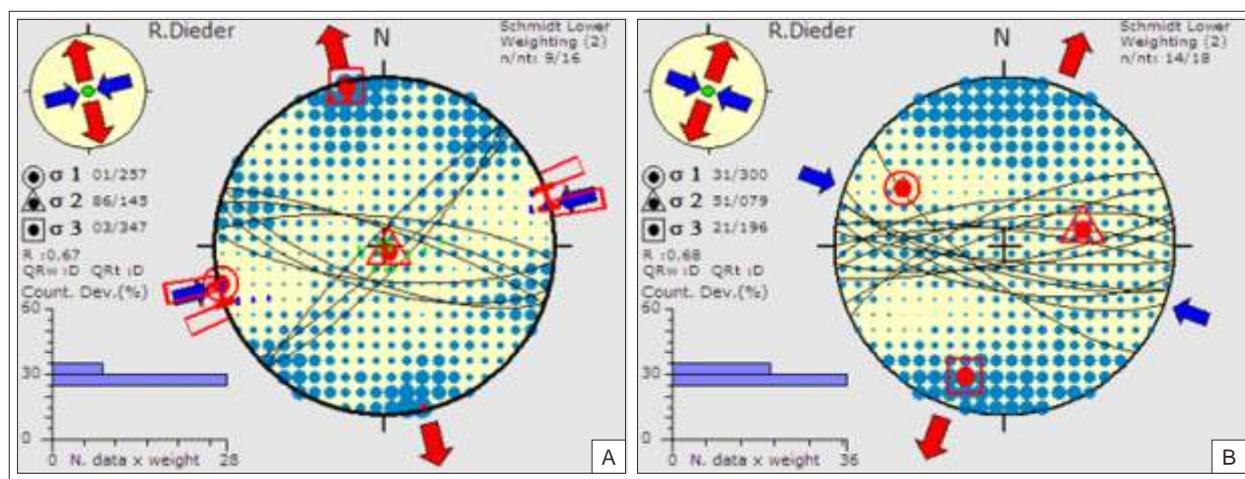
(Gambar 10). Tampak pada bagian tengah Kepulauan Aru gaya gaya yang bekerja adalah sistem *strike-slip*. Berdasarkan umur batuan yang terpengaruh oleh gaya yang bekerja, sistem *strike-slip* berpengaruh pada batuan Formasi Koba yang berumur Miosen Awal sampai Miosen Tengah (Gambar 11). Maka pada Miosen Akhir, gaya ini bekerja dan membentuk sesar geser yang memisahkan Pulau Trangan dan Pulau Maikor serta memisahkan Pulau Maikor dan Pulau Koproor. Berbeda dengan apa yang Padmawidjaja dan Subagyo (2014) paparkan bahwa selat-selat yang terbentuk di Kepulauan Aru terbentuk pada masa Plistosen.

Stress tensor jenis *extensional* bekerja hampir di seluruh Kepulauan Aru dan mempengaruhi batuan batuan yang lebih muda dari Formasi Koba. Sistem ini membentuk sesar-sesar normal dan memperlebar selat-selat yang memisahkan antara pulau di Kepulauan Aru yang sebelumnya telah bergeser akibat sistem gaya *strike-slip*.

Hasil analisis bidang kekar dengan *stereonet* memperlihatkan tegasan utama (σ_1) yang berbeda-beda arah (*trend*) dan kemiringannya (*plunge*) (Tabel 2). Untuk mengetahui arah tegasan rata-rata dan periode deformasi di Kepulauan Aru, maka data tersebut kembali diplotkan di *stereonet* untuk kemudian dianalisis (Gambar 12). Dengan asumsi arah tegasan utama orde tertua akan mempunyai kemiringan (*plunge*) yang lebih tinggi atau berada relatif di tengah pada proyeksi *stereonet* dibandingkan orde yang lebih muda yang mempunyai kemiringan (*plunge*) yang lebih rendah, maka dapat direkonstruksi sejarah deformasi yang meliputi orde, kedudukan dan arah umum tegasan utama (σ_1) dan jenis *stress regime*.



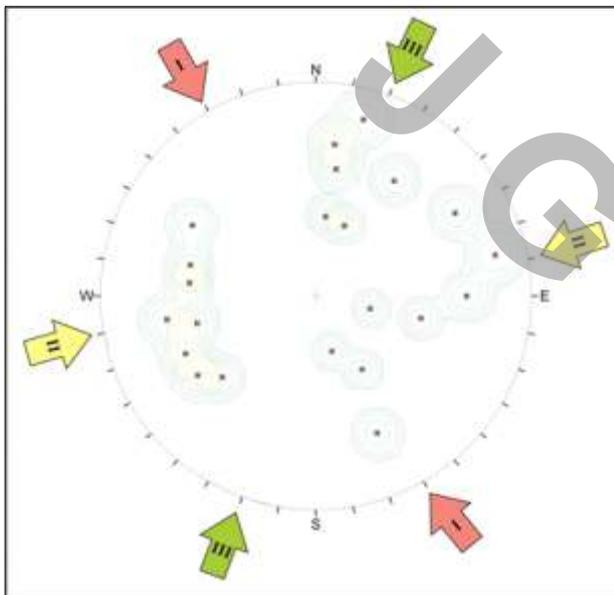
Gambar 10. Peta integrasi hasil interpretasi citra DEM yang menunjukkan kelurusan dan analisis *stress tensor* di daerah penelitian. Tampak bahwa *stress tensor* berjenis *extensional* mendominasi hampir seluruh daerah penelitian dan menghasilkan sesar normal, sedangkan di bagian tengah beberapa hasil analisis menunjukkan *stress tensor* jenis *strike-slip* yang menghasilkan sesar mendatar.



Gambar 11 (A) analisis bidang kekar di lokasi 11/WG/063 dan (B) analisis bidang kekar di lokasi 11/WG/065, keduanya diukur pada Formasi Koba yang berumur Miosen Awal-Miosen Tengah dan menunjukkan *stress tensor* jenis *strike-slip*.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Arah Tegangan Utama (s1) dengan stereonet di setiap Formasi.

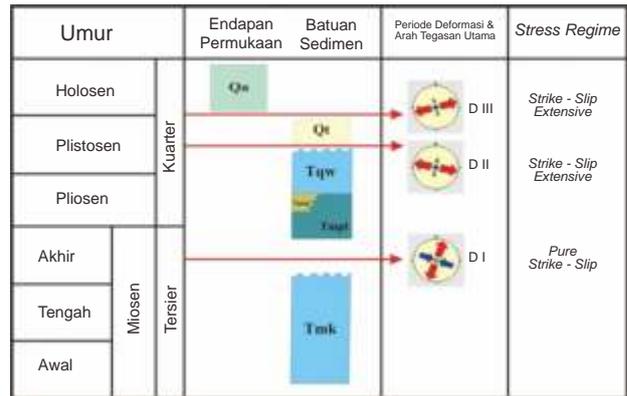
Umur	Formasi	Lokasi	Arah Tegangan Utama (1)		
			Trend	Plunge	
Plistosen Akhir	Tanah Merah	11-WG067	156	20	
	Wasir	11-IG301	15	9	
	Wasir	11-IG303	34	24	
	Wasir	11 RT001	236	23	
	Jambulenga	11-IG305	9	28	
	Jambulenga	11-IG311	229	30	
	Jambulenga	11-IG312	300	23	
	Jambulenga	11-RT010	261	20	
	Pliosen - Plistosen	Jambulenga	11-RT012	164	60
		Jambulenga	11-RT013	257	31
Jambulenga		11-RT014	7	49	
Jambulenga		11-WG056	59	16	
Manumbai		11-IG304	276	29	
Manumbai		11-IG310	22	51	
Manumbai		11-WG059	284	28	
Manumbai		11 WG060	7	19	
Miosen	Koba	11-RT003	246	23	
	Koba	11-RT006	90	20	
	Koba	11-WG063	77	9	
	Koba	11-WG065	103	61	
	Koba	11-WG066	148	46	
	Koba	11-WG071	102	37	



Gambar 12. Orde dan kedudukan tegangan utama (1) di Cekungan Wokam, dimana arah dan urutan periode dari tua ke muda adalah: tegangan utama pertama (D I) berarah U150° T, arah tegangan utama kedua (D II) berarah U80° T dan arah tegangan utama ketiga (D III) berarah U20°T.

Berdasarkan hasil rekonstruksi, yang kemudian dibandingkan dengan geologi regional, maka dapat disusun evolusi tektonik regional daerah Kepulauan Aru, Cekungan Wokam yang telah mengalami 3 (tiga) kali periode deformasi (Gambar 13), yaitu:

Periode deformasi regional I (DI) terjadi pada Miosen Akhir dengan sifat *Pure strike-slip*, dan arah tegangan utama (1) yaitu U150° T – U330° T. Periode ini dimulai setelah Formasi Koba diendapkan, menghasilkan struktur lipatan yang hampir berarah timurlaut-baratdaya, dan



Gambar 13. Evolusi Tektonik Kepulauan Aru, Cekungan Wokam yang telah mengalami tiga kali periode deformasi serta *stress regime* pada masing-masing periode deformasi

sesar mendatar yang hampir timurlaut-baratdaya. Hal ini berkesesuaian dengan apa yang dipaparkan oleh Hall (1995) bahwa pada Miosen Akhir adalah periode dimana *strike-slip zone* yang berarah timurlaut-baratdaya terbentuk akibat pergerakan lempeng benua Australia yang terus bergerak ke arah utara sehingga menubruk lempeng Pasifik di bagian utaranya yang terjadi pada Oligosen-Miosen Tengah. Pertemuan lempeng yang bersifat *oblique* inilah yang menghasilkan sesar-sesar mendatar berarah timurlaut-baratdaya sepanjang zona patahan Tarera-Aiduna yang berarah hampir barat-timur (Alda and Kim, 2008).

Setelah Formasi Manumbai diendapkan, terjadi periode deformasi regional II (DII) dengan sifat *strike-slip Extensive*, dan arah tegangan utama (1) yaitu U080° T–U260° T. Periode ini merupakan periode deformasi yang terekam sangat baik di Kepulauan Aru. Cekungan Wokam, dan merupakan periode deformasi yang bersifat ekstensional, sehingga terbentuk beberapa selat yang berarah baratlaut-tenggara yang memisahkan pulau-pulau di Kepulauan Aru.

Periode Deformasi Regional III (DIII) dengan sifat *strike-slip Extensive*, periode ini dimulai setelah Formasi Tanah Merah diendapkan atau diperkirakan terbentuk pada Holosen, dengan arah tegangan utama (1) yaitu U020° T – U200° T. Periode deformasi ini menghasilkan kelurusan kelompok C yang sangat susah diidentifikasi arah pergerakannya di lapangan. Pada kedua periode deformasi terakhir ini, wilayah Kepulauan Aru mengalami fase tektonik yang relatif stabil, ditandai dengan reaktifasi yang bersifat ekstensional dari sesar-sesar mendatar yang telah terbentuk sebelumnya.

Berdasarkan tektonostratigrafi yang disusun oleh Robertson (1992) dalam (Alda dan Kim, 2008), pada Kenozoikum daerah paparan Arafura telah mengalami tiga kali periode deformasi yang diawali pada Paleosen dengan adanya *Thermal Sag*, periode kedua pada Miosen Tengah adalah *fase convergen* dan periode ketiga pada Miosen Akhir-Plistosen terjadi fase kompresi (Gambar 14). Ada beberapa poin yang dapat ditarik kesebandingannya dengan hasil penelitian, yaitu periode deformasi yang terjadi pada Miosen adalah fase konvergen yang dalam hal ini berbeda dengan hasil penelitian penulis dimana pada Miosen Akhir adalah periode *pure strike-slip*. Pada Plistosen Robertson menyatakan didominasi gaya-gaya kompresi, hal ini berbeda dengan hasil penelitian penulis yang berargumen bahwa fase *Strike-slip Extensive* masih berlanjut hingga Holosen. Perbedaan ini dimungkinkan karena lokasi yang dibahas oleh Robertson berada di bagian barat laut paparan Arafura yang berdekatan

dengan Palung Aru dan bersifat regional, sedangkan apa yang penulis lakukan berada didaerah yang relatif lebih stabil di sebelah timur zona subduksi dan berdasarkan data-data lokal yang terekam di daerah penelitian.

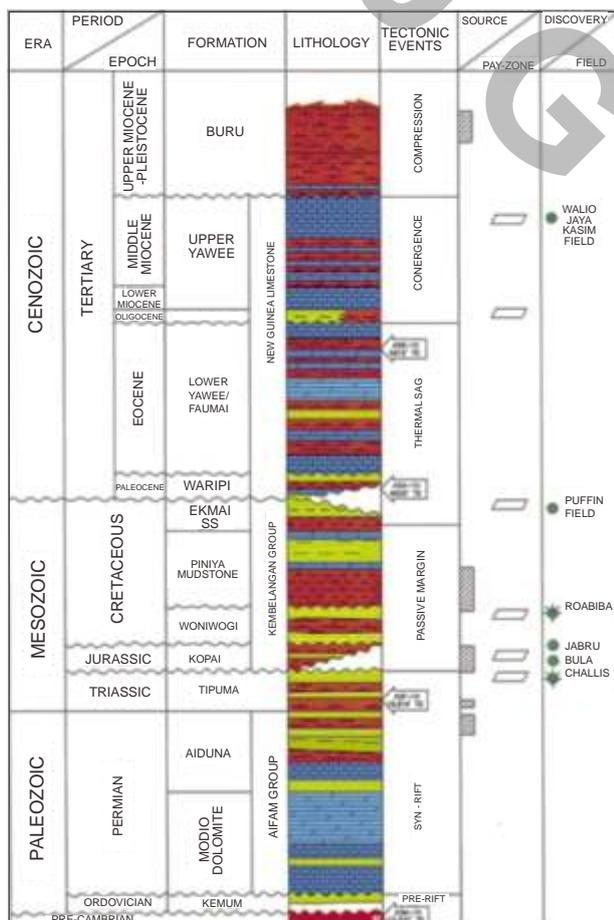
KESIMPULAN

Struktur geologi yang berkembang di Cekungan Wokam, Kepulauan Aru mengikuti pola periode deformasi regional yang berkaitan dengan pergerakan Lempeng Benua Australia ke arah utara sehingga menabrak Lempeng Samudera Pasifik pada Oligosen-Miosen Tengah. Periode deformasi di daerah ini dimulai pada Miosen Akhir setelah Formasi Koba diendapkan, dengan tegasan utama berarah relatif barat laut-tenggara dengan *stress tensor* bersifat *pure strike-slip*. Periode ini menghasilkan sumbu lipatan dan sesar mendatar yang berarah timurlaut - baratdaya yang merupakan cabang-cabang dari *Tarera-Aiduna Fault Zone*.

Periode deformasi kedua terjadi setelah Formasi Manumbai diendapkan pada Plistosen Akhir, gaya ekstensional berkembang sangat dominan dan menghasilkan sesar normal sebagai reaktifasi dari sesar-sesar yang terbentuk sebelumnya serta membentuk selat-selat di Kepulauan Aru. Pada Holosen, kegiatan tektonik masih berlangsung dengan terbentuknya pola kelurusan hampir utara-selatan. Kelurusan ini diperkirakan sebagai sesar, akan tetapi arah pergerakannya tidak dapat dideskripsikan dengan baik, disebabkan proses pelarutan batugamping yang intensif sehingga jejak-jejak struktur geologi tidak dapat terekam di lapangan. Pada kedua periode deformasi terakhir ini, wilayah Kepulauan Aru mengalami fase tektonik yang relatif stabil yang ditandai oleh *stress tensor* yang bersifat *extensional*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh anggota tim penelitian geologi dan geofisika cekungan Wokam, khususnya kepada saudara Dr. Ir. Wahyu Gunawan dan saudara Rahmat Y. Saragih, S.T., atas bantuannya dalam pengambilan data geologi struktur di lapangan, serta Kepala Pusat Survei Geologi atas izinnya untuk menerbitkan artikel ini.



Gambar 14. Kolom stratigrafi daerah Paparan Arafura bagian barat laut (Robertson (1992) dalam (Alda and Kim, 2008) yang menunjukkan perbandingan tektonostratigrafi dari Paleozoikum hingga Kenozoikum dari hasil penulis.

ACUAN

- Alda, Ho., and Kim Jae Ho., 2008. Tertiary Hydrocarbon Play in NW Arafura Shelf, Offshore South Papua: Frontier Area in Eastern Indonesia., *Proceeding of Indonesian Petroleum Association 32nd Annual Convention and Exhibition*.
- Amri, U., P.H. Wijaya, T. Hestirianoto., H.M. Manik., 2015. Bathimetry and Recent Sediments Profiles of North Aru Islands Offshore West Papua., *Bulletin of Marine Geology*, Vol. 30, No.2, 55-64.
- Badan Geologi., 2009. *Peta Cekungan Sedimen Indonesia Berdasarkan Data Gaya Berat dan Geologi*. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral.
- Charlton, T. R., 2000. Tertiary evolution of the eastern Indonesia complex. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 603-631.
- Charlton, T. R., 2001. Permo-Triassic evolution of Gondwanan eastern Indonesia, and the final Mesozoic separation of SE Asia from Australia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 595-617.
- Davies, H. L., 2012. The Geology of New Guinea-the cordilleran margin of the Australian Continent., *Episodes*, Vol. 5, No.1, 87-102.
- Delvaux, D., and B. Sperner., 2003. New Aspect of Tectonic Stress Inversion with Reference to the TENSOR Program. From Nieuwland, D.A, (ed.), *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*. Geological Society, London, Special Publication, 212, 75-100.
- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi., 2015. Rencana Strategis 2015-2019 Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral, Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi.
- Granath, J.W., ChristJ.M., Emmet,P.A., Dinkelman, M.G., 2010. Insight into the Tectonic of Eastern Indonesia from Arafuraspan, A Long-Offset A-Long Record 2D Seismic Reflection Data Set., *Proceeding of Indonesian Petroleum Association 34th Annual Convention and Exhibition*.
- Hall, R., 1995. Plate Tectonic Reconstructions of the Indonesian Region., *Proceeding of Indonesian Petroleum Association 24th Annual Convention and Exhibition*.
- Hartono dan Ratman., 1992. *Peta Geologi Lembar Aru, Maluku Tenggara skala 1:250.000*. Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Padmawidjaya, T., dan Subagyo., 2014. Penelitian Gaya Berat dan Geomagnet Kepulauan Aru, Cekungan Wokam., *Jurnal Geologi Kelautan*, Vol. 12, No. 1, 1-14.
- Pigram, C.J., Panggabean, H., 1984. Rifting of the northern margin of the Australian Continent and the origin of some microcontinents in Eastern Indonesia. *Tectonophysics*, 107, 331-353.
- van Ufford, A. Q., and Cloos, M., 2005. Cenozoic tectonics of New Guinea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 89(1), 119-140.

LAMPIRAN 1

Data Pengukuran Bidang Kekar pada setiap Formasi Batuan di Kepulauan Aru, Maluku

Formasi	Umur	Kode Lokasi	Lokasi	Data Bidang Kekar	
				Strike	Dip
Formasi Tanahmerah	Holosen	11/WG/067	Pulau Penembutan	200	83
				290	70
				320	73
				150	87
				305	78
				309	76
				175	84
				207	79
				0	84
				192	73
				245	84
				328	84
				125	86
				318	81
				183	82
				187	84
				178	84
				218	79
				152	83
				Formasi Wasir	Pliosen-Pleistosen
66	84				
262	42				
158	85				
78	80				
11/G/303	Pulau Ujir	168	60		
		160	70		
		180	79		
		240	62		
		20	80		
11/RT/001	Tanjung Fatujarlag	350	69		
		70	74		
		5	59		
		300	75		
		225	60		
Anggota Jambelaga	Pliosen	11/G/305	Desa Jerrom	300	70
				25	69
				350	54
				355	70
				15	64
				30	66
				330	60
				10	50
				143	50
				22	80
Formasi Mambuai	Pliosen	11/G/311	Desa Lon Lau	135	76
				146	52
				285	72
				124	78
				48	58
				33	54
				22	34
				50	64
				50	71
				156	81
				71	82
				141	76
				59	64
				17	41
				87	60
Anggota Jambelaga	Pliosen	11/G/314	Desa Lon Lau	357	72
				97	37
				165	68
				10	76
				15	78
				200	68
				334	24
				20	80

Formasi	Umur	Kode Lokasi	Lokasi	Data Bidang Kekar	
				Strike	Dip
Anggota Jambelaga	Pliosen	11/G/311	Desa Lon Lau	30	70
				287	67
				23	64
				120	71
				158	70
				221	85
				250	80
				272	69
				18	76
				74	66
		11/G/312	Desa Jambelaga	264	74
				14	75
				180	82
				14	78
				24	65
				8	89
				260	64
				37	66
				356	69
				7	74
11/WG/056	Benjina	358	70		
		62	66		
		360	70		
		337	74		
		190	75		
		103	74		
		335	72		
		130	72		
		115	68		
		138	69		
11/RT/010	Pulau Tragega	197	83		
		183	77		
		174	82		
		108	57		
		123	84		
		125	75		
		165	74		
		108	69		
		172	81		
		264	10		
11/RT/012	Pulau Tragega	95	68		
		70	55		
		220	35		
		270	72		
		120	75		
		80	82		
		75	79		
		80	75		
		120	76		
		120	72		
11/RT/013	Pulau Tragega	110	84		
		250	82		
		205	85		
		170	68		
		168	68		
		215	69		
		142	58		
		320	70		
		268	65		
		315	68		
11/RT/013	Pulau Tragega	90	58		
		120	65		
		325	74		
		265	70		
		200	67		
11/RT/013	Pulau Tragega	164	81		
		120	70		

LAMPIRAN 1
Lanjutan

Formasi	Umur	Kode Lokasi	Lokasi	Data Bidang Kehar					
				Strike	Dip				
Anggota Komite Kerja Formasi Mamusabai	Pleocsa	11/RD/043	Pulau Tangan	170	74				
				20	65				
				345	64				
				125	63				
				95	66				
				337	75				
				270	74				
				25	75				
				296	70				
				295	72				
				15	75				
				315	76				
				45	75				
				283	72				
				50	70				
				40	75				
				75	71				
				350	64				
		150	65						
				11/RD/044	Pulau Tangan	59	70		
						270	25		
						184	71		
						288	20		
						190	66		
						237	51		
						90	70		
						25	87		
						280	75		
						292	58		
						188	50		
						70	75		
						205	87		
						345	11		
						200	64		
						270	25		
						36	88		
337	11								
11	80								
35	80								
241	56								
156	28								
292	85								
36	86								
Formasi Mamusabai	Mioson Akhir- Pleocsa	11/IG/304	Sungai Marjan	60	70				
				332	66				
				320	52				
				325	65				
				44	70				
				30	50				
						11/IG/310	Desa Seli Batu Batu	32	74
								43	78
								192	75
								330	86
								170	77
								98	68
				11/WG/059	S. Wokai	275	80		
						140	67		
						95	79		
						205	66		
						263	66		
						140	75		
				11/WG/060	S. Wokai	230	84		
						140	81		
						315	76		
						35	87		
						60	26		
						165	82		

Formasi	Umur	Kode Lokasi	Lokasi	Data Bidang Kehar					
				Strike	Dip				
Formasi Mamusabai	Mioson Akhir- Pleocsa	11/WG/060	S. Wokai	170	76				
				28	81				
				51	84				
				Formasi Kota	Mioson Awal- Mioson Tengah	11/WG/063	S. Wokai	255	74
								185	68
								95	73
								110	72
								80	73
								298	82
								275	76
								285	80
								48	84
63	82								
44	79								
72	76								
		11/WG/065	S. Wokai	224	84				
				268	77				
				218	78				
				234	74				
				185	80				
				79	82				
				110	69				
				135	77				
				128	74				
				256	83				
				262	77				
				276	81				
		11/WG/066	S. Wokai	295	70				
				277	82				
				95	83				
				248	78				
				185	77				
				84	80				
				148	86				
				108	68				
				265	68				
				245	77				
				165	60				
				328	81				
		11/WG/071	Desa Ecorin	218	72				
				150	68				
				318	72				
				168	79				
				18	78				
				318	74				
				178	74				
				165	76				
				207	69				
				156	64				
				302	69				
				311	78				
15	71								
		11/WG/071	Desa Ecorin	314	76				
				198	72				
				128	78				
				85	69				
				228	72				
				125	75				
				138	82				
				270	74				
				48	68				
				85	71				
				267	75				
				193	78				
204	77								
122	71								
211	80								

LAMPIRAN 1

Lanjutan

Formasi	Umur	Kode Lokasi	Lokasi	Data Bidang Kekar			
				Strike	Dip		
Formasi Koba	Miosen Awal-Miosen Tengah	11/WG074	Desa Ecorin	128	70		
				129	81		
				98	69		
				208	74		
				88	78		
				130	70		
				11/RT003	Desa Jelin	5	70
						175	69
						35	70
						24	75
		20	76				
		285	70				
		300	69				
		11/RT006	Pulau Tranggan			200	76
						260	64
						205	74
				275	60		
				45	55		
				295	70		
				190	60		
				75	65		
				130	72		
				310	72		
		155	60				
		10	60				