

Penelitian Magnetostratigrafi dan Penerapan Satuan Stratigrafi Polaritas Magnet sebagai Satuan Kronostratigrafi: Studi Kasus di Cekungan Bandung serta Daerah Mojokerto dan Sangiran, Jawa

E. Sunardi

Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran
Jln. Raya Bandung-Sumedang Km.21, Jatinangor 45363

Sari

Paleomagnetisme berperan memunculkan suatu jenis stratigrafi baru yang didasarkan atas fenomena pembalikan nonperiodik polaritas medan magnet bumi. Karena fenomena tersebut bersifat global, maka dapat dijadikan dasar yang potensial bagi korelasi geologi, dan dikenal sebagai satuan kronostratigrafi polaritas magnet. Arah magnetisasi remanen yang terbalik terhadap medan magnet bumi telah lama diketahui semenjak masa awal sejumlah riset permulaan paleomagnetik. Perkembangan modern skala waktu polaritas geomagnet (GPTS), yang diinisiasi pada sekitar tahun 1960-an, mengikuti kemajuan dalam metode penarikan yang lebih akurat. Rekaman paleomagnetik yang diperoleh untuk batuan berumur tiga juta tahun di daerah Sangiran, turut mengoreksi penelitian magnetostratigrafi yang sebelumnya, serta diperolehnya posisi stratigrafi batas-batas dan kejadian baru polaritas geomagnet. Berdasarkan korelasi rekaman variasi sekular di Mojokerto dan Sangiran, telah disusun magnetostratigrafi formasi-formasi berumur Plistosen di Mojokerto. Stratigrafi polaritas geomagnet untuk masa empat juta tahun terakhir di sekitar Cekungan Bandung dapat berguna bagi pedoman posisi isokron dalam korelasi stratigrafi.

Kata kunci: paleomagnetisme, kronostratigrafi polaritas magnet, isokron, korelasi stratigrafi

Abstract

Palaeomagnetism has a role to make a new stratigraphic nomenclature based on the earth magnetism of a nonperiodic reversal polarity phenomenon. Since this phenomenon has a global impact, it can be used as a potential correlation, known as the Magnetic Polarity Chronostratigraphy Unit. Remanent magnetism direction having reversal polarity against present earth magnetic field has long been known since early palaeomagnetic studies. Modern development of geomagnetic polarity time scale (GPTS), initiated in early 1960's has followed the advancement of radiometric dating which is more accurate. A palaeomagnetic record obtained in the past of 3 Ma of rock in the Sangiran Area, East Java, has contributed in making a correction of previous magnetostratigraphy researches as well as a new level stratigraphy boundary and a new event of geomagnetic polarity. Based on the correlation record of secular variation in Mojokerto and Sangiran, the magnetostratigraphy of formations of Pleistocene age at Mojokerto has been arranged. The geomagnetic polarity stratigraphy of the past 4 Ma of the rocks in the Bandung Basin and its surrounding areas can be used as a guidance of isochronous position in the stratigraphy correlation.

Keywords: paleomagnetism, magnetic polarity chronostratigraphy, isochron, stratigraphic correlation

Pendahuluan

Latar Belakang

Paleomagnetisme telah memberikan pengaruh yang begitu besar pada perkembangan ilmu kebumihuman pada tiga puluh tahun terakhir. Pada awal masa perkembangannya, studi di berbagai mandala kontinen yang berbeda turut berkontribusi pada rejuvenasi hipotesis/teori apungan benua (*continental drift*) dan pada masa awal perkembangan teori tektonik lempeng (*plate tectonic*).

Pada perkembangan berikutnya, paleomagnetisme berperan memunculkan suatu jenis stratigrafi baru yang didasarkan atas fenomena pembalikan nonperiodik polaritas medan magnet bumi (*polarity reversal of the geomagnetic field*), yang pada masa kini kemudian dikenal dengan nama stratigraphy polaritas magnet (*magnetostratigraphy, magnetic polarity stratigraphy*). Stratigrafi polaritas magnet (selanjutnya disebut magnetostratigrafi) adalah suatu interval susunan batuan beku atau stratifikasi batuan sedimen yang dicirikan oleh arah kemagnetan batuan, baik dalam arah kemagnetan geomagnet saat ini (*normal polarity*) atau berarah 180° dari arah medan magnet bumi saat ini (*reverse polarity*).

Cara dan teknik stratigrafi yang baru ini sungguh sangat mempengaruhi wacana mengenai tektonik lempeng dengan memberikan suatu kronologi dalam penafsiran anomali magnetik di lempeng samudra (Vine dan Matthews, 1963). Dalam tiga puluh tahun terakhir, skala waktu polaritas geomagnet (*Geomagnetic Polarity Time Scale-GPTS*) telah menjadi salah satu pokok bagi pengalibrasian waktu geologi. Suatu jembatan korelatif antara biozonasi dan umur absolut serta interpolasi antarmur absolut telah sukses diperlihatkan untuk masa Kenozoikum dan Akhir Mesozoikum melalui GPTS ini. Pada skala waktu Trias-Kuarter paling akhir, profil anomali magnetic cekungan samudra dengan laju pemekaran yang relatif konstan dijadikan sebagai standar komparatif GPTS tersebut. Penelitian magnetostratigrafi serta *paleolatitude* juga digunakan sebagai kalibrasi dalam rekonstruksi Skala Waktu Geologi 2009 (Gradstein dan Ogg, 2004; Walker dan Geissman, 2009).

Stratigrafi polaritas magnet pada daratan maupun yang diperoleh dari batuan inti kerak samudra menjadi “penghubung” antara GPTS dan biozonasi (dalam hal ini, juga batas-batas *stage* geologi). Umur-umur absolut yang didapat dari penarikan

radiometri berkorelasi langsung ataupun tidak langsung dengan skala waktu polaritas geomagnet dalam kolom magnetostratigrafi, atau secara tidak langsung berkorelasi dengan biozonasi. Dipandang dari sisi kepentingannya dalam kalibrasi waktu geologi, untuk memahami laju proses-proses geologi, maka kontribusi stratigrafi polaritas magnet terhadap ilmu kebumihuman menjadi jelas.

Sifat berpasangan medan magnet bumi dalam arah yang berlawanan (*dipole*) memiliki arti bahwa kejadian pembalikan polaritas (*polarity reversal*) terjadi dalam waktu yang bersamaan secara global (*globally synchronous*), sementara proses pembalikannya sendiri terjadi dalam kisaran waktu 10^4 - 10^8 tahun (Butler, 1992). Oleh karena alasan itu, stratigrafi polaritas magnet menyediakan suatu *time lines* stratigrafi yang berlaku global dalam tingkat resolusi waktu yang sedemikian tinggi. Tiga teknik yang termasuk dalam magnetostratigrafi, adalah (Butler, 1992):

- Stratigrafi magnet batuan (*rock magnetic stratigraphy*), menggunakan sifat-sifat magnetik tanpa pengarah, misalnya suseptibilitas magnet dan intensitas induksi remanen untuk keperluan korelasi;
- Stratigrafi paleointensitas magnet (*paleointensity magnetic stratigraphy*), mempergunakan rekaman intensitas paleomagnet;
- Stratigrafi variasi sekular magnet (*secular variation magnetic stratigraphy*), mempergunakan perubahan arah sekularitas medan magnet bumi, diterapkan dalam korelasi stratigrafi sedimen Kuarter.

Mengelompokkan batuan berdasarkan waktu, dan melibatkan penyusunan sistematis stratifikasi ke dalam satuan-satuan bernama masing-masing berhubungan dengan interval waktu geologi yang spesifik. Arah prinsip konstruksi suatu skala waktu geologi yang terstandar, adalah untuk menetapkan jenjang-jenjang satuan kronostratigrafi (skala internasional), yang dapat dipakai sebagai standar referensi dimana pun batuan yang ada di bumi dapat di hubungkan/korelasikan (di-interelasikan).

Paling tidak, syarat-syarat yang harus dipenuhi agar suatu skala waktu geologi standar layak secara operasional adalah:

1. Menunjukkan setiap umur di berbagai tempat.
2. Menunjukkan umur, baik secara luas dan bersifat umum, maupun secara detail dan

terkait dengan waktu atau umur tertentu yang spesifik.

3. Bersifat konsisten, sehingga tidak sering menjadi subjek perubahan.

Sebagaimana diketahui bersama bahwa diasumsikan material referensi yang ideal bagi skala waktu geologi seharusnya adalah suatu penampang stratigrafi tunggal yang memiliki urutan stratifikasi yang lengkap, yang merepresentasikan seluruh umur/waktu geologi, dan tanpa *gap* pada interval rekaman stratigrafinya. Hubungannya dengan penyusunan suatu kerangka stratigrafi sebagai metode korelasi stratigrafi yang konsisten, dan akurat, ditandai oleh keseragaman polaritas magnet sebagai suatu unit kronostratigrafi.

Permasalahan

Paleomagnetisme merupakan suatu studi medan geomagnet purba sepanjang skala waktu geologi berdasarkan sifat kemagnetan batuan (*rock magnetism*). Medan magnet bumi merupakan besaran vektor yang perilakunya berubah temporal dalam hal intensitas dan arah, perubahan terbesar dan paling drastis adalah fenomena pembalikan polaritas (*reversal*). Karena fenomena tersebut bersifat global, maka dapat dijadikan dasar yang potensial bagi korelasi. Kombinasi pengukuran paleomagnet dengan radiometri atau pendekatan kronologi lainnya merupakan salah satu teknik *dating* yang potensial.

Skala waktu polaritas geomagnet pertama kali ditetapkan pada sekitar tahun 1960-an berdasarkan kombinasi studi paleomagnet batuan vulkanik muda dengan penarikan K-Ar dating, dan menunjukkan bahwa pembalikan medan geomagnet terjadi secara global. Skala waktu pembalikan geomagnet ini, hingga kini telah mengalami beberapa kali revisi. Revisi terutama dilakukan untuk menentukan umur absolut sebagai batas polaritas berdasarkan data isotop dan kalibrasi astronomis.

Penyempurnaan yang dilakukan untuk mendapatkan umur nisbi maupun mutlak sesungguhnya untuk mendapatkan rekaman kronostratigrafi dengan resolusi tinggi. Berdasarkan data polaritas, penarikan radiometri, dan posisi stratigrafi tersebut selanjutnya dapat direkonstruksi yang dikenal sebagai stratigrafi polaritas magnet (magnetostratigrafi).

Berdasarkan syarat-syarat dan dasar pemikiran tersebut, satuan stratigrafi selanjutnya mengarah

pada suatu resolusi stratigrafi yang tinggi dan tidak lagi bicara tentang kisaran umur. Sebagai contoh penerapan terhadap unit stratigrafi gunung api (sebagai genetik) dan sekuen stratigrafi (sebagai *high resolution stratigraphy*). Pada IUGS *guide* unit tersebut secara hati-hati diusulkan sebagai *unconformity bounded unit/stratigraphy* (Salvador, 1994).

Kronostratigrafi yang dimaksud dalam hal ini adalah pengertian *levelling (chronostratigraphic level)* dengan banyak aspek pendekatan yang sifat dasarnya ada dua, absolut dan relatif (relatif misalnya paleontologi/penetapan biostratigrafi). Kedua sifat dasar tersebut (*time*) terkait dengan/*constrain* (ruang) lokal, regional, dan global. Misalnya Neogen atau Paleogen pada *Tertiary Classification*.

Merujuk pada Sandi Stratigrafi Indonesia 1996 (Martodjojo dan Djuhaeni, 1996), dasar pemikiran dan tujuan pembagian satuan kronostratigrafi telah secara eksplisit terdapat di dalam Bab VI pasal 50 dan 53, yang menerangkan bahwa klasifikasi atau penggolongan stratifikasi batuan secara sistematis berdasarkan interval waktu geologi adalah suatu klasifikasi kronostratigrafis. Disepakati pula bahwa keseragaman polaritas magnet adalah sebagai suatu unit kronostratigrafi. Interval waktu tersebut dapat ditentukan berdasarkan geokronologi atau metode indikator/penunjuk (kesamaan) waktu yang lain. Klasifikasi stratigrafi demikian dipakai sebagai kerangka waktu bagi penyusunan urutan peristiwa geologi lokal, regional, dan global. Interval waktu dalam hal ini mengarah pada usaha *refining* sebagai suatu *chronostratigraphic level* (dengan pengertian yang sebaiknya *high resolution*).

Satuan-satuan kronostratigrafi telah diterima luas sebagai tradisi berdasarkan panjangnya waktu satuan-satuan lithostratigrafi dan biostratigrafi. Saat ini dikenal juga suatu unit formal lainnya, yaitu satuan kronostratigrafi polaritas magnet yang merupakan satuan waktu geologi yang didasarkan atas medan magnet remanen pada batuan. Dengan demikian, perlu pemikiran bahwasanya satuan kronostratigrafi polaritas magnet dapat dimasukkan ke dalam Sandi Stratigrafi Indonesia, 1996.

Tujuan dan Lokasi Studi

Studi kasus ini dibuat dengan tujuan selain untuk memberikan pemahaman tentang penerapan satuan stratigrafi polaritas magnet sebagai satuan

kronostratigrafi juga disajikan sebagai penelaahan tentang perkembangan penelitian paleomagnetisme-magnetostatigrafi di Indonesia.

Lokasi studi yang diambil sebagai bahan dalam studi kasus serta penerapan satuan stratigrafi polaritas magnet adalah di Sangiran, Mojokerto, dan sekitar Cekungan Bandung (Gambar 1). Penelitian di daerah Sangiran, Jawa Tengah, dan Mojokerto, Jawa Timur, tertuju pada formasi-formasi berumur Plio-Plistosen yang dimaksudkan untuk menentukan umur dan posisi stratigrafi fosil *Pithecanthropus*. Penelitian yang berlokasi di daerah Bandung, Jawa Barat, diambil mengingat lokasi tersebut dapat dipandang sebagai suatu laboratorium alam yang khas. Dengan demikian penelitian ilmu kebumihian dengan berbagai pendekatan yang melibatkan Geologi Kuarter, Paleomagnetisme, Geokronologi, Geokimia, Petrologi, Palinologi, dan Vulkanologi dapat berkontribusi bagi pemahaman kronostratigrafi Kuarter Cekungan Bandung.

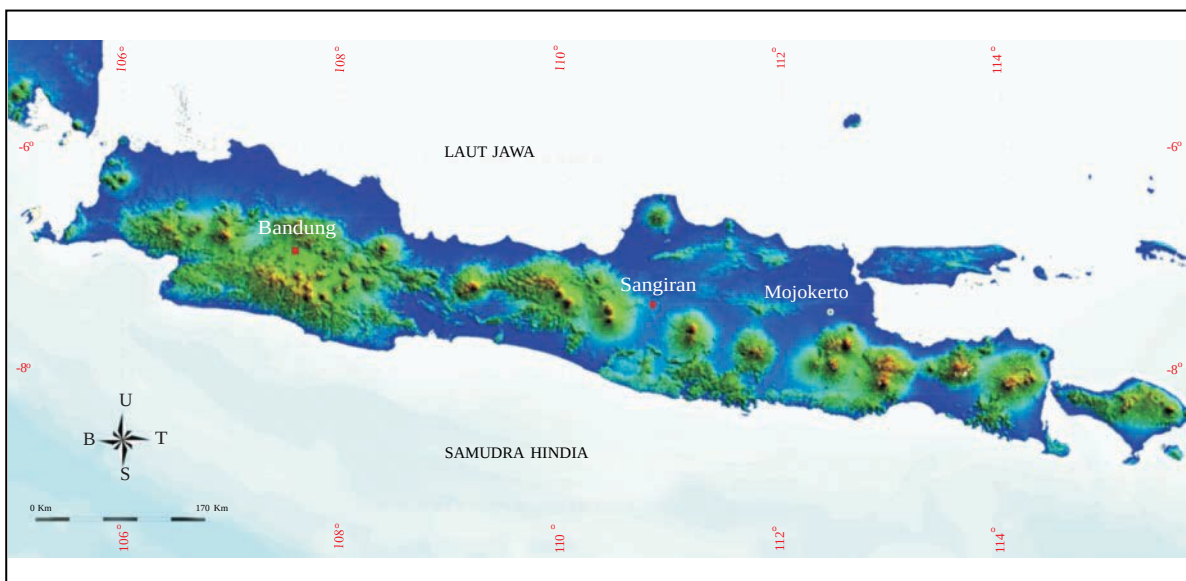
Metodologi

Metodologi dalam studi ini terdiri atas dua tahapan penting, yaitu:

- Pemercontohan paleomagnetik. Percontoh material geologi untuk studi ini (*material*

reference) diambil dari bor dan singkapan yang terorientasi, sehingga posisinya dapat dikenali seperti semula. Orientasi tersebut sangat penting, mengingat langkah selanjutnya dalam interpretasi paleomagnetik adalah menghubungkannya dengan koordinat geografis saat ini. Percontoh diambil dengan bor khusus untuk memperoleh batuan inti.

- Prosedur laboratorium. Untuk bahan analisis, batuan inti dibuat sedemikian rupa berbentuk silinder atau kubus (dengan diameter dan tinggi/panjang tertentu) yang sesuai bagi *sample holder*. Bahan analisis tersebut diukur berat dan volumenya, serta *natural remanent magnetic* (NRM), dan *magnetic susceptibility*. Demagnetisasi dilakukan dengan cara *thermal* dan *alternating field* (Zijderveld, 1967), untuk mendapatkan karakteristik *remanence magnetization*, yang selanjutnya dideterminasi dengan prosedur *principal component analysis* (PCA) (Kirschvink, 1980) untuk menghitung arah. Penetapan *level-level* stratigrafi ditentukan berdasarkan bukti-bukti radiometrik, dan kemudian ditentukan skala waktu polaritas geomagnet berdasarkan sifat polaritas yang dihasilkan.



Gambar 1. Lokasi penelitian sebagai bahan dalam studi kasus serta penerapan satuan stratigrafi polaritas magnet di Sangiran, Mojokerto dan sekitar Cekungan Bandung.

Hasil, Pembahasan, dan Diskusi

Perkembangan Penelitian di Bidang Paleomagnetisme

Arah magnetisasi remanen (*Natural Remanent Magnetization* – NRM) yang terbalik terhadap medan magnet bumi yang berlaku telah lama diketahui semenjak masa awal riset-riset permulaan paleomagnetik. Brunhes (1906, dalam Opdyke & Channell, 1996) telah melaporkan arah-arah magnetisasi batuan lava berumur Pliosen dari Perancis yang memberikan arah magnetisasi ke selatan dengan inklinasi ke arah atas, kemudian mempertalikan fenomena tersebut dengan adanya anomali lokal medan geomagnet.

Brunhes memperlihatkan bahwa efek pemangangan pada daerah kontak dengan batuan beku turut termagnetisasi dengan arah polaritas yang sama dengan batuan beku yang menerobosnya. Pada saat aliran lava mengekstrusi atau saat retas mengintrusi batuan samping, temperatur batuan atau sedimen yang diterobosnya akan meningkat hingga melampaui *blocking temperature* mineral-mineral magnetik. Pada saat itu, magnetisasi pada mineral atau batuan tersebut akan mengalami penyesuaian (*reset/adjusted*) sesuai dengan arah medan magnet yang berlaku pada saat *baking* efek itu terjadi.

Penelitian Brunhes ini diikuti kemudian oleh Matsuyama (1929) pada batuan vulkanik dari daerah Jepang dan Cina utara. Dalam studinya ini, dilibatkan beragam percontoh lava yang memiliki arah kemagnetan terbalik terhadap medan geomagnet saat ini. Matsuyama mengaitkan pembalikan medan magnet ini dengan fenomena *reversal* medan magnet bumi, dan memisahkan percontoh-percontoh batuan ke dalam dua kelompok: Kelompok pertama yang berumur Plistosen, dengan NRM sesuai dengan arah medan magnet bumi saat ini. Kelompok yang kedua memiliki arah kemagnetan antipodal (berlawanan) terhadap arah kemagnetan batuan kelompok pertama dan juga terhadap arah medan geomagnet yang berlaku saat ini, kebanyakan merupakan batuan lava yang berumur lebih tua dari Plistosen. Hal ini menjadi semacam petunjuk pertama bahwa polaritas kemagnetan bumi kemungkinan berasosiasi dengan umur-umur geologi tertentu. sehingga umur relatif dan posisi stratigrafi batuan-batuan vulkanik teruji secara stratigrafis.

Studi Matsuyama menunjukkan bahwa batuan dan sedimen berumur Pleistosen Awal dan Kuartar memiliki pengarah magnet normal, sedangkan yang memiliki arah kemagnetan terbalik muncul dalam batuan berumur Pleistosen Awal dan Pliosen. Einarsson and Sigurgeirsson (1955) menggunakan kompas magnet untuk mendeteksi lava-lava dengan arah kemagnetan terbalik di Eslandia, dan mulai melakukan pemetaan distribusi zona polaritas kemagnetan pada sekuen batuan. Mereka menunjukkan adanya ketebalan yang mirip pada batuan yang memiliki polaritas normal dan terbalik. Hal ini mengimplikasikan bahwa medan magnet memiliki bias polaritas yang kecil pada zaman Kenozoikum.

Suatu studi yang dilakukan oleh Opdyke dan Runcorn (1956) pada aliran lava di pegunungan San Francisco Arizona Utara menunjukkan bahwa semua lava muda yang diobservasi memiliki polaritas magnet normal, sedangkan yang secara stratigrafis lebih tua umumnya terdiri atas lava yang memiliki polaritas berlawanan (*reversal*). Berdasarkan hasil studi ini maka diasumsikan bahwa kejadian *reversal* polaritas medan magnet bumi terjadi di sekitar batas Plio-Plistosen. Berdasarkan penelitian Hospers (1951) di Eslandia, lava muda umumnya termagnetisasi secara normal, sedangkan yang tua memiliki polaritas *reversal*, dan di bagian bawahnya kembali menunjukkan polaritas normal. Mereka membagi lava Plio-Plistosen ini ke dalam tiga zonasi magnet, yaitu N1-R1-N2 (Normal1, Reversal1, Normal2). Mereka kemudian mengkorelasikan N2 dengan umur *Astian* dan R1 dengan *Vilanfranchian*, serta menduga bahwa glasiasi paling awal terjadi di Eslandia pada umur Pliosen.

Magnetometer yang dapat dipergunakan untuk mengukur kemagnetan batuan beku telah ada semenjak sebelum Perang Dunia II, yang kemudian dikembangkan pula suatu magnetometer yang dapat mengukur NRM batuan sedimen. Blackett (1956) mengembangkan magnetometer statik yang lebih sensitif. Studi paleomagnetik pada batuan sedimen dipelopori sejak penelitian Creer drr. (1954) yang mendokumentasikan enam belas zonasi perulangan polaritas suatu strata setebal 3000 m. Batuan ini mengalami koreksi kemiringan akibat pelipatan untuk menunjukkan magnetisasi sebelum terjadinya pelipatan. Selain itu, penelitian ini juga melaporkan adanya pembalikan polaritas pada batuan Devon dan Trias.

Perkembangan modern skala waktu polaritas geomagnet (GPTS) yang diinisiasi pada tahun 1960an mengikuti kemajuan dalam metode penarikan Kalium-argon (K-Ar) yang lebih akurat untuk batuan beku. Secara umum, batuan beku yang berasal dari umur yang sama, namun diperoleh dari berbagai lokasi yang berbeda, memiliki kesamaan arah polaritas magnet. Penentuan umur dan polaritas magnet dari berbagai batuan beku yang semakin banyak dikompilasikan menuntun kita untuk mengembangkan pertama kalinya suatu skala waktu polaritas geomagnet dalam interval 0 hingga 5 juta tahun.

Bila terdapat penentuan umur yang pendek dan arah polaritas magnet, interval polaritas diperkirakan memiliki durasi dalam kisaran satu juta tahun. Interval polaritas semacam ini disebut sebagai *epoch* polaritas, dan dinamai menurut nama peneliti-peneliti penting dalam sejarah penelitian kemagnetan bumi. Selain itu, ternyata di dalam interval *epoch* polaritas tersebut juga kemudian dijumpai interval-interval singkat fenomena pembalikan polaritas geomagnet yang terekam. Interval yang durasinya lebih pendek ini kemudian dikenal dengan *event* polaritas, dan dinamai menurut lokasi pertama kalinya percontoh batuan diperoleh. Saat ini diketahui bahwa tidak ada perbedaan yang mendasar antara *epoch* polaritas dan *event* polaritas. Dimungkinkan adanya suatu interval polaritas dalam beragam spektrum durasi waktu.

Skala waktu polaritas geomagnet terutama didasarkan atas penarikan K-Ar dan penentuan polaritas geomagnet batuan beku. Tiga ratus lima puluh empat penentuan umur dan polaritas batuan dipergunakan untuk menyusun skala waktu ini.

Paleomagnetisme yang didapat dari batuan inti (*core*) laut dalam memberikan informasi penting bagi sekuens polaritas geomagnet untuk masa lima juta tahun. Hasil penentuan batuan sedimen menunjukkan bahwa akumulasi sedimen terlihat menerus tanpa rumpang yang signifikan.

Geologi Kuartar dan Geomagnetisme

Hingga sekitar 15-20 tahun lalu, para ahli paleomagnetik dan ahli magnetik batuan berkonsentrasi terutama dalam mengkarakterisasi sifat-sifat magnetik dari hanya sejumlah kecil spesies mineral magnetik. Yang diteliti secara intensif adalah mineral magnetit yang mengandung substitusi titanium, yang terbentuk pada temperatur tinggi dan berasosiasi dengan batuan beku. Mineral ini berperan penting

dalam studi paleomagnetik di batuan kerak benua dan pada perkembangan hipotesis pemekaran kerak samudra, mineral ini terbentuk pada temperatur tinggi dan stabil terpreservasi dalam temperatur yang rendah.

Selain mineral-mineral magnetit yang terbentuk pada temperatur tinggi, mineral-mineral magnetik yang terbentuk dalam temperatur rendah turut pula diselidiki, terutama yang berasosiasi dengan sedimen-sedimen berwarna kemerahan seperti pada umumnya sedimen terestrial, yang didominasi oleh hematit.

Perkembangan penelitian magnetisme yang terkait dengan aspek lingkungan, berfokus pada sedimen dan penerapannya pada beragam lingkungan Kuartar telah turut merangsang penelitian yang berorientasi pada pengenalan dan identifikasi pembentukan mineral-mineral magnetik serta proses magnetisme yang membentuknya.

Periode geologi Kuartar yang dimulai sekitar 2,6 juta tahun lalu, merupakan suatu periode sejarah bumi yang baru terjadi dan tengah berlangsung. Periode Kuartar merupakan suatu kurun waktu yang dinamis, dicirikan oleh perubahan iklim yang signifikan, ekspansi dan kontraksi daratan-daratan es seukuran benua, terjadinya naik-turun permukaan laut global, migrasi dan kepunahan fauna serta flora, tak ketinggalan pula evolusi dan pertumbuhan populasi manusia modern.

Rangkaian perubahan iklim bumi dan biosfir yang dramatis ini seringkali terekam jejak alamiahnya sebagai fenomena variasi fisis, kimia, dan isotop dalam sedimen atau es. Rekaman jejak tersebut, bila dapat dimunculkan dan dibaca, memungkinkan kita untuk dapat di antaranya mengidentifikasi waktu, laju, dan mekanisme perubahan iklim dan lingkungan di masa lampau.

Informasi tersebut semakain lama semakin terasa penting dan kritis. Hal itu memberikan kita suatu ikatan dan perspektif baik bagi pemahaman kita mengenai bumi saat ini dan nilai prediktif untuk masa mendatang, terutama yang berkaitan dengan perubahan iklim global.

Butiran mineral-mineral magnetik, terutama oksida besi dan sulfida, umumnya banyak terdapat dalam sedimen berumur Kuartar, tanah, debu, dan organisme, meskipun hadir dalam konsentrasi minor. Oleh karenanya, yang melatarbelakangi analisis material Kuartar adalah bahwa proses-proses lingkung-

an turut menyimpan rekaman susunan kemagnetan alam, dan merefleksikan proses-proses yang terjadi di masa lalu dan saat ini.

Penelitian Paleomagnetisme dan Stratigrafi Polaritas Magnet

Sangiran, Mojokerto, dan Pegunungan Selatan

Pada awal tahun 1990 an, dilakukan beberapa riset bersama antara Faculty of Science Kobe University dengan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, untuk penelitian magnetostratigrafi formasi-formasi batuan yang mengandung fosil hominid dari daerah Sangiran dan Mojokerto (Hyodo dr., 1992&1993).

Penelitian yang tertuju pada formasi-formasi berumur Plio-Plistosen tersebut dilakukan untuk menentukan umur dan level stratigrafi fosil *Pithecanthropus* di Sangiran dan Mojokerto. Beberapa hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya rekaman variasi sekular arah medan geomagnet dari kedua daerah dalam pola yang konsisten. Rekaman paleomagnetik yang diperoleh untuk batuan yang berumur tiga juta tahun lalu di daerah Sangiran turut mengoreksi penelitian magnetostratigrafi sebelumnya, serta diperolehnya *level* stratigrafi batas-batas dan *event* baru polaritas geomagnet (Gambar 2).

Berdasarkan korelasi rekaman variasi sekular di Mojokerto dan Sangiran, maka magnetostratigrafi formasi-formasi berumur Pleistosen di Mojokerto telah dapat disusun. Zonasi stratigrafi bagi keberadaan *Pithecanthropus* di Sangiran berkisar dari batas bawah *event* Jaramilo hingga batas Brunhes-Matsuyama, dan level stratigrafi bagi Homo Mojokertensis terletak pada batas bawah *event* Jaramilo (Gambar 2).

Studi paleomagnetisme untuk kepentingan tektonik telah diterapkan pula di Jawa pada pertengahan tahun 2000 an (Ngkoimani dr., 2006). Studi yang melibatkan paleomagnetisme dan geokronologi ini dilakukan pada percontoh batuan Formasi Andesit Tua yang tersusun atas aliran lava, kubah lava, dan intrusi subvulkanik di sekitar Yogyakarta (Pegunungan Selatan Jawa Bagian Tengah). Penentuan umur dengan radiometri K-Ar pada batuan di daerah Pegunungan Selatan menunjukkan kisaran umur antara Kapur hingga Miosen Akhir. Demagnetisasi dengan cara *alternating field* pada percontoh

batuan memperlihatkan intensitas NRM yang arah remanennya konsisten. Analisis kemagnetan batuan menunjukkan bahwa remanen magnetik dibawa oleh mineral magnetit atau titanomagnetit.

Penafsiran data paleomagnetik mengimplikasikan bahwa sebagian Jawa bagian tengah secara tektonis berasal dari suatu tempat di selatan posisi saat ini. Hasil penentuan umur absolut dan posisi paleogeografi setidaknya menunjukkan adanya tiga paleoposisi Jawa bagian tengah (Gambar 3). Hasil lain studi ini menunjukkan bahwa pada Akhir Kapur ($75,87 \pm 4,06$ jtl.) hingga Eosen ($47,42 \pm 3,19$ jtl.) paleoposisi Jawa bagian tengah berada sekitar $16 - 20^\circ$ Lintang Selatan, sedangkan pada umur Oligosen ($29,63 \pm 2,26$ jtl. – $25,35 \pm 0,65$ jtl.) terletak antara $12 - 13^\circ$ Lintang Selatan. Selanjutnya, pada umur Miosen terletak sekitar $10 - 11^\circ$ Lintang Selatan.

Penemuan sejarah kemagnetan bumi dan implikasi tektonik pada Formasi Andesit Tua tidak hanya menambah informasi geokronologi batuan beku di Jawa, tetapi juga memperbaharui pemahaman evolusi tektonik Jawa.

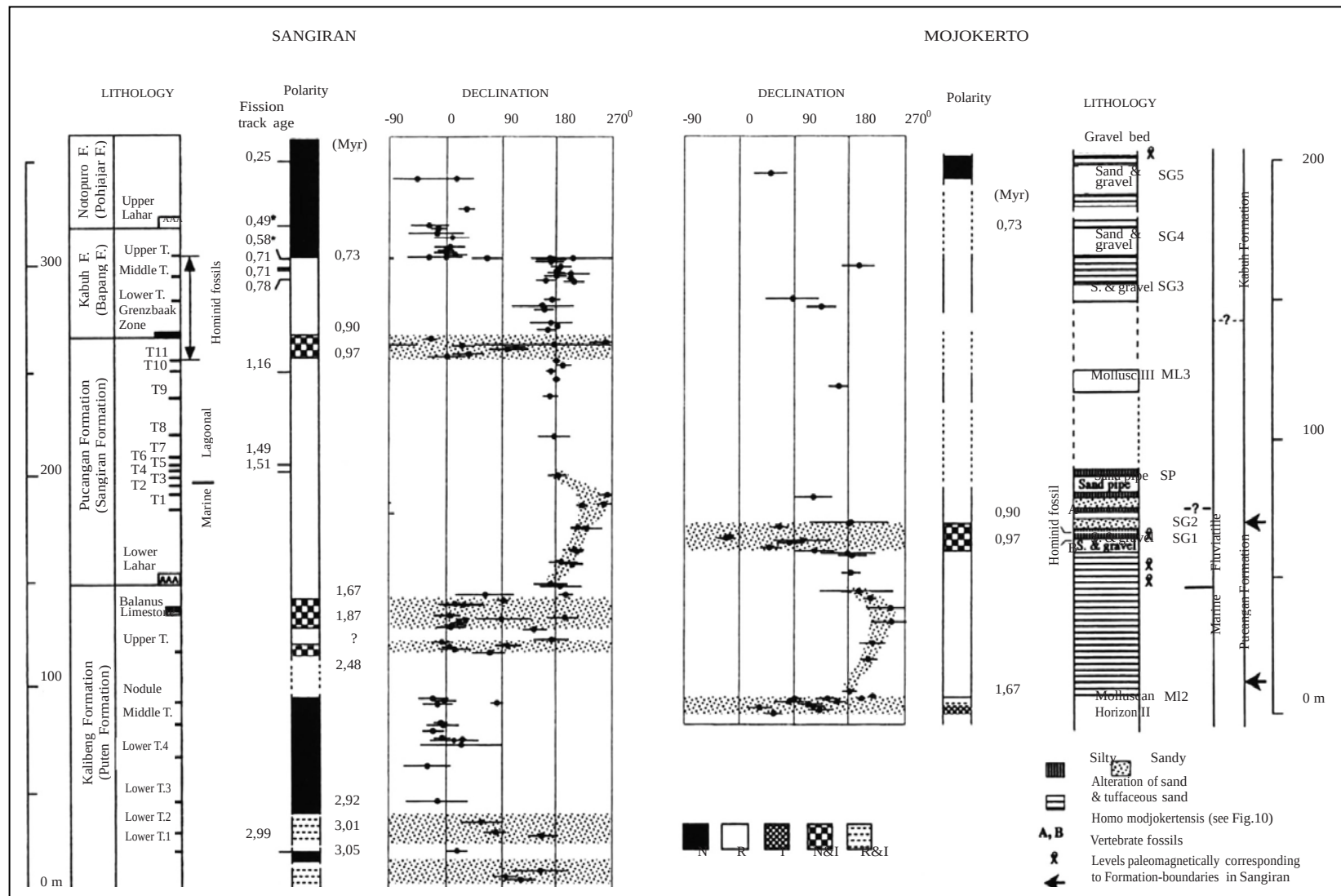
Cekungan Bandung

Daerah Bandung yang berlokasi di Jawa bagian barat, dipandang sebagai suatu laboratorium alam yang khas.

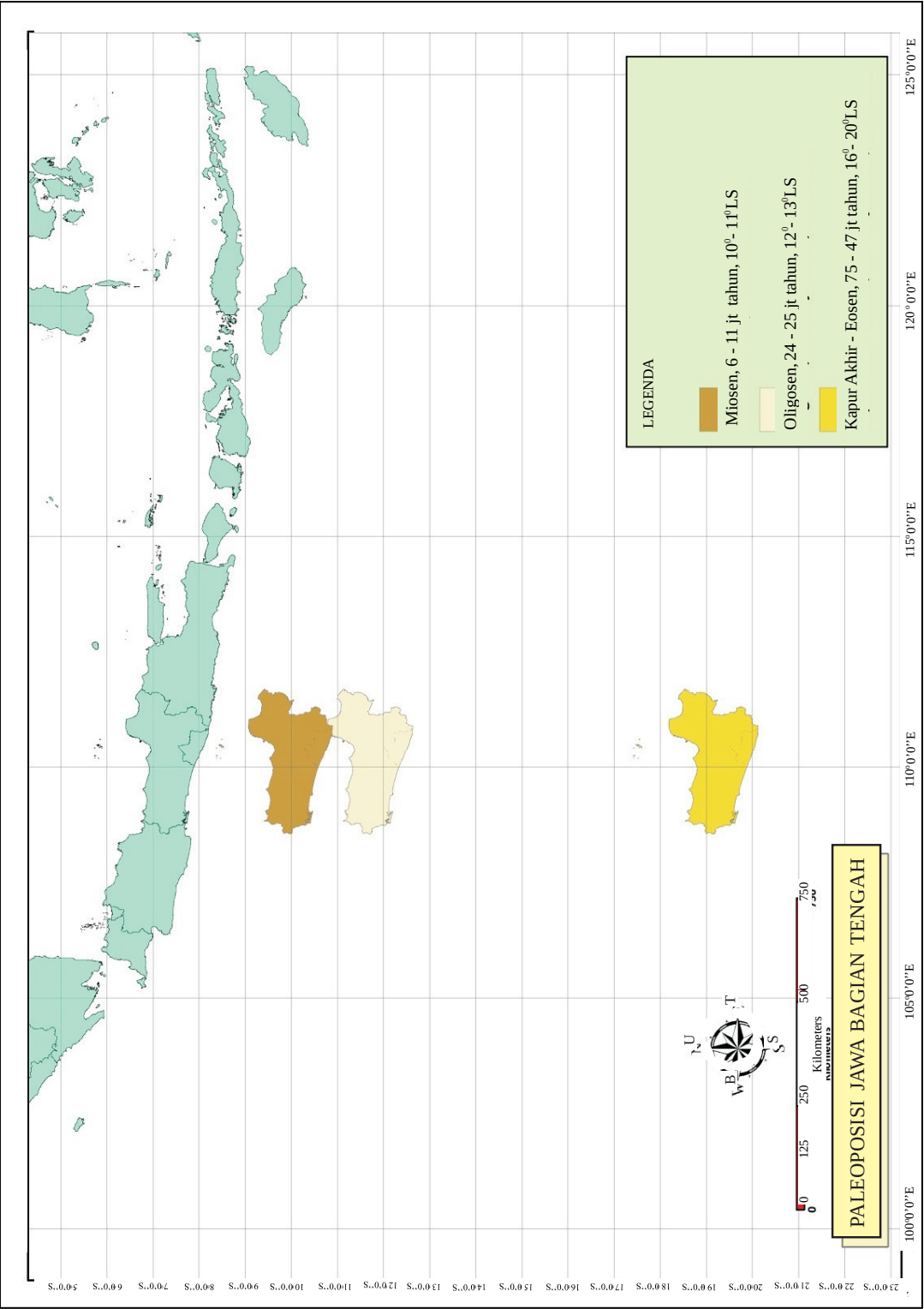
Daya tarik utama Cekungan Bandung secara geologis adalah cekungan ini merupakan suatu dataran tinggi zona fisiografi Bandung (van Bemmelen, 1949), yang tersusun oleh berbagai batuan vulkanik serta endapan fluvio-lakustrin. Cekungan ini dikelilingi oleh kerucut-kerucut gunung api Kuartar dan kubah-kubah lava, sebagai ciri aktivitas vulkanik yang aktif.

Karena secara umum skema kronologi batuan vulkanik di Cekungan Bandung belum didasarkan atas penarikan radiometri, penentuan umur radiometri dengan beragam teknik memiliki kontribusi untuk kronostratigrafi Plio-Plistosen. Di samping batuan vulkanik, studi paleomagnetik pada batuan sedimennya akan membantu korelasi sekuen kronostratigrafi dengan standar skala waktu polaritas geomagnet (Mankinen dan Darlymple, 1979; Cande dan Kent, 1992, 1995).

Studi geokimia dan petrologi batuan vulkanik di Jawa Barat pada umumnya ditujukan untuk mengungkap keterkaitannya dengan kerangka tektonik, serta sistem palung busur dari Busur Sunda



Gambar 2. Rekaman paleomagnetik yang diperoleh untuk batuan yang berumur tiga juta tahun lalu di daerah Sangiran dan Mojokerto. Zonasi stratigrafi bagi keberadaan *Pithecanthropus* di Sangiran berkisar dari batas bawah even Jaramilo hingga batas Brunhes-Matuyama, dan level stratigrafi bagi *Homo modjokertensis* terletak pada batas bawah even Jaramilo.



Gambar 3. Hasil penentuan umur absolut dan posisi paleogeografi, menunjukkan adanya tiga paleoposisi Jawa bagian tengah. Akhir Kapur ($75,87 \pm 4,06$ jt.) hingga Eosen ($47,42 \pm 3,19$ jt.), paleoposisi Jawa bagian tengah berada sekitar $16-20^\circ$ Lintang Selatan, sedangkan pada umur Oligosen ($29,63 \pm 2,26$ jt. - $25,35 \pm 0,65$ jt.) terletak antara $12-13^\circ$ Lintang Selatan. Selanjutnya, pada umur Miosen terletak sekitar $10-11^\circ$ Lintang Selatan. (Data dari Ngkoimani drr., 2006).

(Whitford dr., 1979; Hutchinson, 1982; Sendjaja dr., 2009). Selain itu, studi petrologi dan geokimia di daerah Cekungan Bandung dan Jawa Barat juga dapat ditujukan untuk mengungkap variasi temporal batuan vulkanik Neogen, serta mengetahui evolusi kondisi mantel bagian atas vulkanisme di daerah ini (Sunardi dan Kimura, 1997; Sendjaja, 2009).

Meskipun daerah Bandung dan sekitarnya memiliki tataan geologi yang menarik, akan tetapi studi yang berkaitan dengan paleomagnetisme sedikit sekali. Penelitian geologi yang dilaksanakan penulis lebih berkonsentrasi pada kepentingan geologi lokal, sehingga dilakukan sebagai riset multi disiplin yang melibatkan paleomagnetisme, penentuan umur radiometri, petrografi, dan geokimia.

Daerah studi ini dipilih karena batuan vulkanik di sekitar Bandung tersebar secara ekstensif (Gambar 4). Percontoh batuan yang diambil dan dikumpulkan dipergunakan baik sebagai bahan penarikan K-Ar maupun sebagai analisis paleomagnetik (Sunardi, 1997). Kedua teknik ini apabila dilakukan secara independen akan memberikan hasil yang ambivalen.

Untuk penentuan posisi stratigrafi batuan vulkanik, dilakukan penelitian secara gabungan antara bukti-bukti penarikan umur radiometri dengan hasil korelasi magnetostratigrafi. Penelitian ini dapat dianggap sebagai penentuan stratigrafi polaritas magnet batuan vulkanik yang pertama dilakukan di Indonesia secara komprehensif.

Batuan vulkanik Miosen Akhir yang diambil sebagai percontoh terdiri atas lava dan breksi-tuf berkomposisi andesitis-basaltis (Alzwar dr., 1992), di antaranya diambil dari daerah Gunung Kromong dan Cipicung.

Vulkanik Kuartar Tua merupakan produk Gunung Api Sunda. Lokasi percontoh batuan yang tersebar di Cijalu, Cikujang, Gunung Batu, Cilame, dan Batu Nyusun merupakan aliran lava yang dijumpai menjadi lava Gunung Tangkuban Parahu. Singkapan aliran lava Kuartar Muda dari Gunung Tangkuban Parahu tersebar di Cicariang, Kasomelang, Dago, Cisarua, dan Maribaya.

Aliran dan kubah lava untuk seluruh unit erupsi vulkanik Plio-Plistosen di Cekungan Bandung berturut-turut berasosiasi dengan Krono Gilbert, Subkrono Mammoth, Subkrono Kaena, Krono Gauss, Krono Matuyama, Subkrono Jaramilo, dan Krono Brunhes. Fenomena ekskursi arah paleomagnetik yang terjadi pada Krono Brunhes dijumpai pula

pada urutan lava dari berbagai lokasi percontoh batuan. Hal ini memperlihatkan terjadinya berbagai variasi arah medan geomagnet yang terekam baik pada waktu yang sama dan waktu yang berbeda.

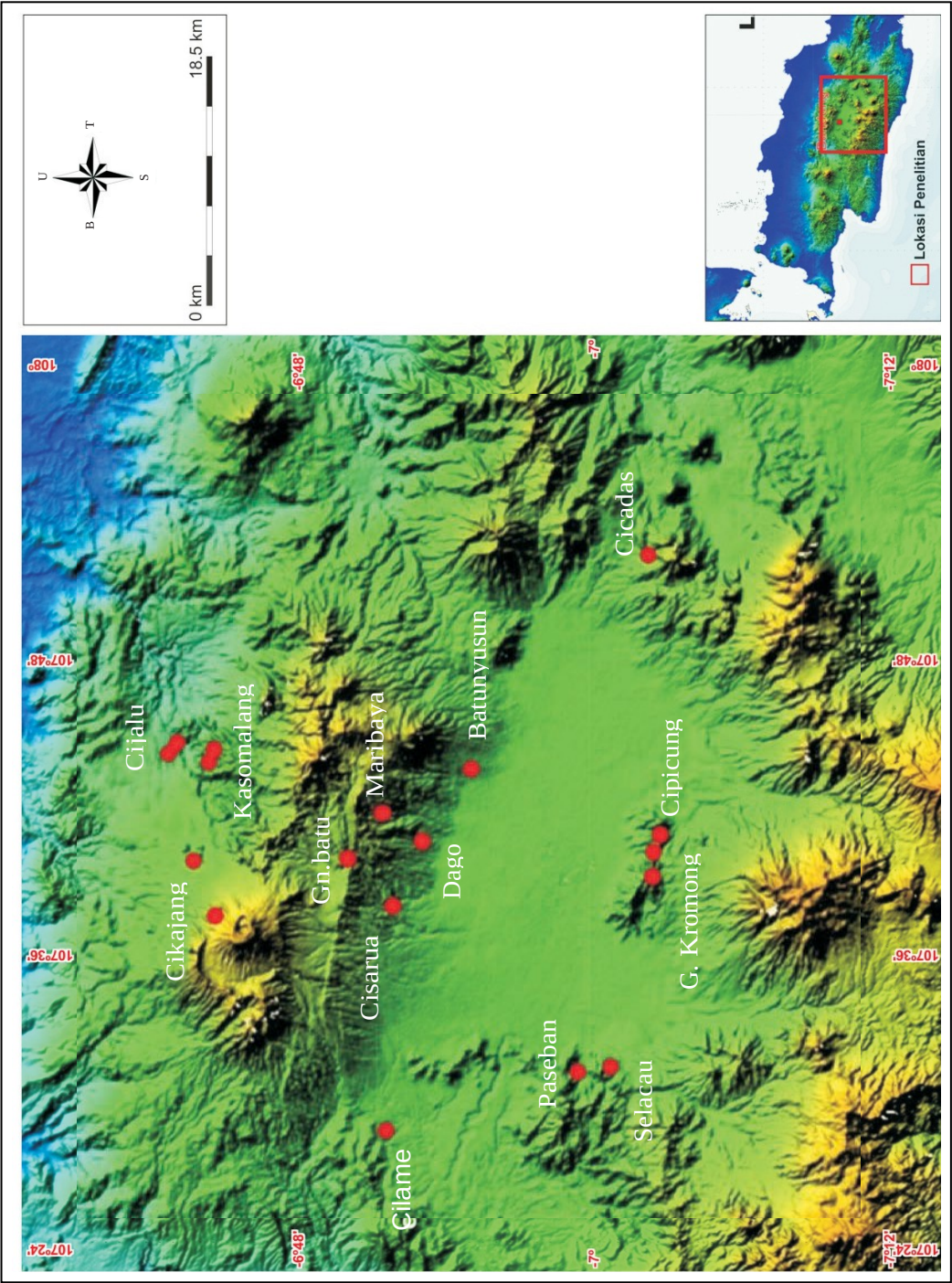
Aktivitas vulkanisme Gunung Tangkuban Parahu terekam baik sejak Plistosen Akhir, sekitar 156 ribu tahun lalu hingga saat ini. Erupsi paling akhir tercatat tahun 1992 yang menghasilkan lumpur dan abu gunung api. Penentuan umur berdasarkan metode penarikan K-Ar untuk lokasi yang berbeda memberikan umur mulai dari 39 ± 3 ribu tahun sampai 46 ± 5 ribu tahun.

Umur rata-rata yang dihitung dari seluruh pengukuran adalah 43 ± 4 ribu tahun. Umur ini mengonfirmasikan hasil penelitian sebelumnya yang dilaporkan oleh Dam dan Suparan (1992). Hasil penelitian mereka yang berdasarkan penarikan ^{14}C menunjukkan adanya influks batuan vulkaniklastika dalam jumlah besar secara episodik di Cekungan Bandung pada masa 40-50 ribu tahun lalu sehingga dapat menjadi petunjuk terjadinya kolaps Gunung Tangkuban Parahu. Dengan demikian, hasil K-Ar 43 ± 4 ribu tahun dianggap sebagai umur ekskursi geomagnet untuk daerah Cekungan Bandung.

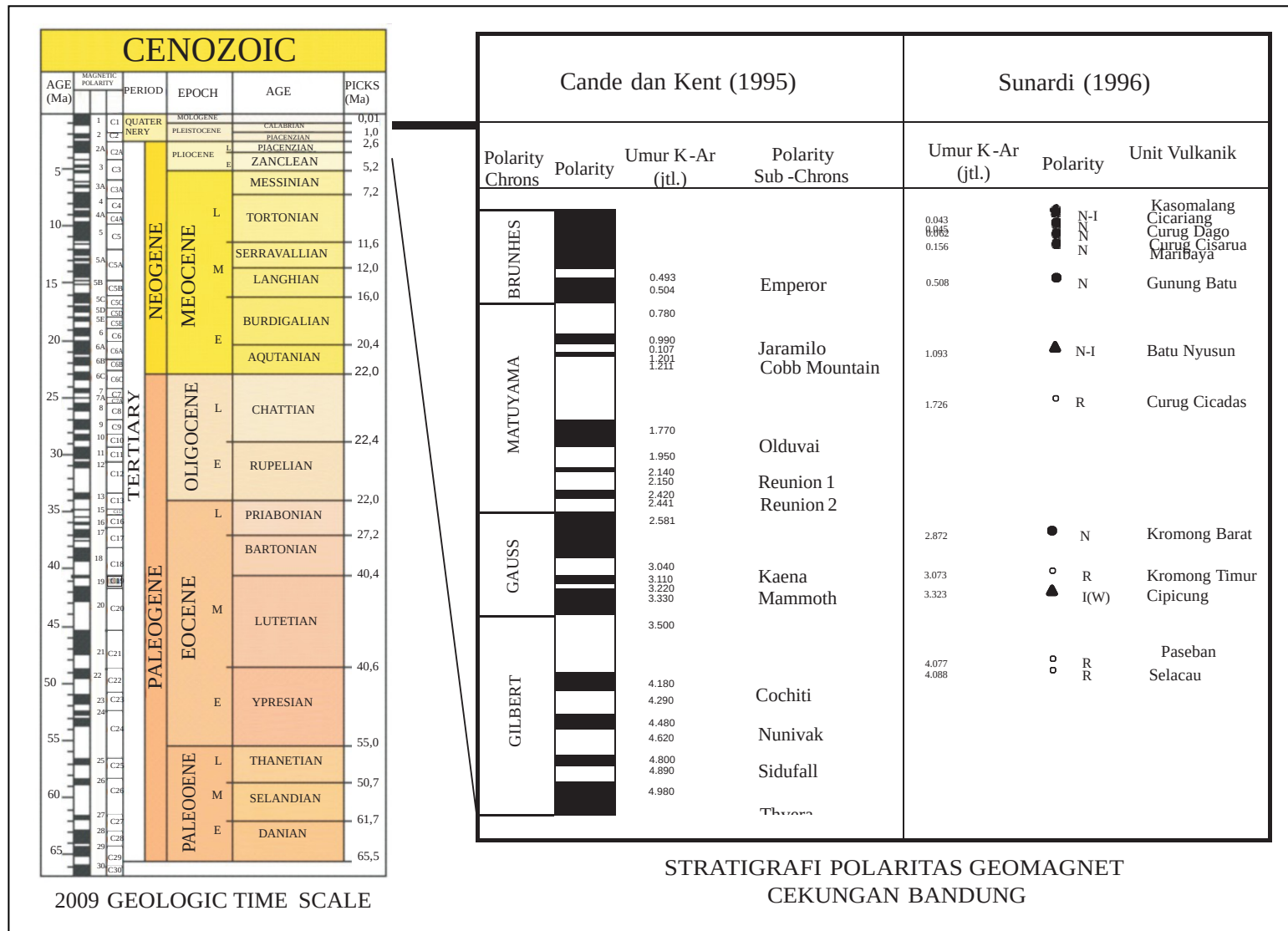
Ekskursi geomagnet pada sekitar 43 ± 4 ribu tahun lalu yang dijumpai pada penelitian ini dapat dikorelasikan dengan ekskursi Laschamp (Bonhommet dan Babkine, 1969; Chauvin dr., 1989; Levi dr., 1990), dengan umur $42,9 \pm 3,9$ ribu tahun.

Hasil studi paleomagnetik, penarikan K-Ar, petrografi, dan geokimia di Cekungan Bandung menunjukkan stratigrafi polaritas magnet aliran dan kubah lava yang berumur Plio-Plistosen. Selain itu diperoleh pula sejarah variasi arah kemagnetan untuk empat juta tahun lalu sebagai pedoman dalam korelasi stratigrafi isokron. Sejarah vulkanisme Kuartar di Cekungan Bandung selanjutnya dapat dibagi ke dalam lima belas unit vulkanik yang berasosiasi dengan kronozona Gilbert, Gauss, Matsuyama, dan Brunhes. Unit vulkanik yang berasosiasi dengan kronozona Gilbert pada dasarnya bersifat kalk-alkali (*low-K*), seperti halnya unit vulkanik di Selacau-Paseban, yang berumur rata-rata 4,1 juta tahun dan memiliki polaritas geomagnet reversal (Gambar 5).

Tiga unit vulkanik yang bersifat kalk-alkali (*low-K*) ditemui pada batuan di lokasi Cipicung dan Gunung Kromong, yang masing-masing secara berturut-turut menunjukkan umur 3,3 juta tahun, 3,1 juta tahun dan 2,9 juta tahun. Lava dari Cipicung



Gambar 4. Lokasi contoh batuan yang diambil dan dipergunakan baik untuk penarikan K-Ar maupun analisis paleomagnetik.



Gambar 5. Stratigrafi polaritas geomagnet untuk masa 4 jt. terakhir di sekitar Cekungan Bandung serta posisinya dalam Skala Waktu Geologi 2009, yang dapat digunakan bagi pedoman posisi isokron dalam korelasi stratigrafi.

menunjukkan arah medan paleomagnetik transisi pada *reversal* Mammoth bagian bawah, lava dari Kromong timur menunjukkan polaritas *reversal* dalam kronozona Gauss, sedangkan lava Kromong barat menunjukkan polaritas normal dalam kronozona Gauss.

Aliran lava yang berasal dari Cicadas, di bagian timur Cekungan Bandung, dikelompokkan ke dalam seri toleit (*low-K*), yang menunjukkan umur 1,7 juta tahun dan merupakan bagian dari kronozona Matsuyama. Lava dari Batu Nyusun bersifat kalk-alkali (*medium-K*), dan menunjukkan umur 1,09 juta tahun, yang kemungkinan berkaitan dengan medan geomagnet transisi selama *reversal* Jaramillo bagian bawah dalam kronozona Matsuyama.

Aliran lava yang dihasilkan oleh Gunung Tangkuban Parahu dikelompokkan ke dalam seri toleit (*high-K*), dengan kisaran umur antara 156 - 43 ribu tahun. Penelitian paleomagnet memperlihatkan adanya dua masa akuisisi kemagnetan *remanen* yang dimiliki oleh batuan vulkanik. Periode pertama berkisar antara 156 - 45 ribu tahun, dan polaritas umumnya bersifat normal sesuai dengan kemagnetan polaritas normal pada kronozona Brunhes. Periode yang kedua berumur rata-rata 43 ribu tahun, berasosiasi dengan periode ekskursi geomagnet Laschamp.

Kesimpulan

Rekaman paleomagnetik yang diperoleh untuk batuan yang berumur tiga juta tahun di daerah Sangiran, turut mengoreksi penelitian magnetostratigrafi sebelumnya.

Zonasi stratigrafi bagi keberadaan *Pithecanthropus* di Sangiran berkisar dari batas bawah *event* Jaramillo hingga batas Brunhes-Matsuyama, dan level stratigrafi bagi *Homo Mojokertensis* terletak pada batas bawah *event* Jaramillo.

Stratigrafi polaritas geomagnet untuk masa empat juta tahun terakhir di Cekungan Bandung dapat berguna bagi pedoman posisi isokron dalam korelasi stratigrafi.

Stratigrafi polaritas geomagnet dalam penelitian ini tidak berasal dari urutan stratigrafi yang menerus, namun masing-masing unit vulkanik telah dapat ditentukan umur absolutnya melalui penarikan

radiometri. Lebih jauh lagi dari penelitian petrologi dan geokimia, batuan vulkanik di sekitar Cekungan Bandung telah berhasil dikarakterisasi.

Penetapan kronostratigrafi yang baru dari penelitian ini dapat dikembangkan sebagai standar korelasi, khususnya untuk stratigrafi Plio-Plistosen, di Pulau Jawa, yang secara litologis umumnya didominasi oleh batuan vulkanik.

Stratigrafi polaritas magnet menyediakan suatu *time lines* stratigrafi yang berlaku global dalam tingkat resolusi waktu yang sedemikian tinggi. Dengan demikian penetapan kronostratigrafi tersebut juga dapat diterapkan di Indonesia.

Ucapan Terima Kasih—Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Billy G. Adhiperdana, M.Si. serta Staf Laboratorium Sedimentologi dan Geologi Kuarter, Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, atas bantuannya dari mulai pengumpulan acuan serta diskusi hingga tulisan ini dapat diselesaikan.

Acuan

- Alzwar, M., Akbar, N. dan Bachri, S. 1992. *Geological Map of the Garut and Pameungpeuk Quadrangle*, Java. Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia.
- Blackett, P.M.S., 1956. *Lectures on Rock Magnetism*. Weizmann Science Press of Israel, Jerusalem, 131 h.
- Bonhommet, N. dan Babkine, J., 1969. Paleomagnetism and potassium-argon age determination of the Laschamp geomagnetic polarity event. *Earth and Planetary Science Letters*, 6, h. 43.
- Brunhes, B., 1906. Dalam: Opdyke, N.D., dan Channell, J.E.T. 1996. *Magnetic Stratigraphy*. Academic press, 343 h.
- Butler, R.F., 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Science Inc., 237 h.
- Cande, S. C. dan Kent, D.V., 1992. A new geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 97, h.13.917-13.951.
- Cande, S. C. dan Kent, D.V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 100, No.B4, h.6093-6095.
- Chauvin, A., Duncan, R. A., Bonhommet, N., dan Levi, S., 1989. Paleointensity of the Earth's magnetic field and K-Ar dating of the Louchardière volcanic flow, central France: New evidence for the Laschamp excursion. *Geophysical Research Letters*, 16, h. 1189.
- Creer, K. M., Irving, E., dan Runcorn, S. K., 1954. The direction of the geomagnetic field in remote epochs in

- Great Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society London Serie A*, 250, h. 144–156.
- Dam, M. A. C. dan Suparan, P., 1992. The Geology of Bandung Basin, West Java, Indonesia. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, 13, 79 h.
- Einarsson, Tr. dan Sigurgeirsson, T., 1955. Rock magnetism in Iceland. *Nature*, 175, h. 892.
- Gradstein, F.M. dan Ogg, J.G., 2004. Geologic Time Scale 2004 – why, how, and where next! *Lethaia*, 37, h. 175–181. Oslo.
- Hospers, J., 1951. Remanent magnetism of rocks and the history of the geomagnetic field, *Nature*, 168, h.1111–1112.
- Hutchinson, C. S., 1982. Indonesia. Dalam: Thorpe, R. S. ed., "Andesite", John Willey & Sons. Chichester, h.207–224.
- Hyodo, M., Sunata, W., and Susanto, E. E., 1992, A Long-Term Geomagnetic Excursion from Plio-Pleistocene Sediments in Java. *Journal of Geophysical Research*, 97(B6), h.9323–9335.
- Hyodo, M., Watanabe, N., Sunata, W., Susanto, E.E., dan Wahyono H., 1993, Magnetostratigraphy of Hominid Fossil Bearing Formations in Sangiran and Mojokerto, Java. *Anthropological Science*, 101(2), h.157–186.
- Kirschvink, J. L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, h.699–718.
- Levi, S., Audonsson, H., Duncan, R. A., Kristjansson, L., Gillot, P.-Y., dan Jakobsson, L., 1990. Late Pleistocene geomagnetic excursion in Icelandic lavas: confirmation of the Laschamp excursion. *Earth and Planetary Science Letters*, 96, h.443.
- Mankinen, E.A. dan Dalrymple, G.B., 1979. Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0–5 m.y. B.P. *Journal of Geophysical Research*, 84, h.615–626.
- Martodjojo, S. dan Djuhaeni, 1996. *Sandi Stratigrafi Indonesia*. Komisi Sandi Stratigrafi Indonesia IAGI, Jakarta, 25h.
- Matsuyama, M., 1929. On the direction of magnetization of basalt in Japan, Tyosen and Manchuria. *Proceedings of the Imperial Academy of Japan*, 5, h.203–205.
- Ngkoimani, LO. Bijaksana, S., dan Abdullah, C.I., 2006. Paleo-Magnetic and Geo-chronological Constraints on the Cretaceous Miocene Tectonic Evolution of Java, *International Geoscience Conference Proceedings*, Jakarta 06-SOT-11, 4 h.
- Opdyke N. D. dan Runcorn S. K., 1956. New Evidence for Reversal of the Geomagnetic Field near the Pliocene-Pleistocene Boundary. *Science*, 123(3208), h.1126.
- Salvador, A., (eds.), 1994, International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure. *International Union of Geological Sciences and Geological Society of America*, 214 h.
- Sendjaja, Y.A. Kimura, J.-I, dan Sunardi, E., 2009. Across-arc geochemical variation of Quaternary Lavas in West Java, Indonesia: Mass balance elucidation using Arc Basalt Simulator model. *Island Arc*, 18, h.201–224.
- Sendjaja, Y.A., 2009. Geochemistry of Late Cenozoic lavas in West Java, Indonesia: Origin of Arc Magmatism and its implication to tectonic development. Dr.Sc. Thesis, Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, Japan.
- Sunardi, E., 1997. *Magnetic Polarity Stratigraphy of the Plio-Pleistocene volcanic rocks around the Bandung Basin, West Java, Indonesia*. Dr.Sc. Thesis, Osaka City University. Japan.
- Sunardi, E. dan Kimura, J., 1997. Temporal chemical variations of the late Neogene volcanic rocks around the Bandung Basin, West Java, Indonesia: An inferred timetable resolving the evolutionary history of the upper mantle. *Journal of Mineralogy Petrology and Economic Geology*, 93, h.103–128.
- Van Bemmelen, R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*. Government Printing Office, Den Haag, Vol I, IA and IB, 732 h.
- Vine F.D. dan Matthews, D.H., 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, h.947–949.
- Walker, J.D. dan Geissman, J.W., (compilers), 2009. Geologic Time Scale: Geological Society of America, doi: 10.1130/2009.CTS004R2C. *Geological Society of America*.
- Whitford, D. J., Nicholls, I. A., dan Taylor, S. R., 1979. Spatial variations in the geochemistry of Quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 70, h.341–356.
- Zijderveld, J. D. A., 1967. A demagnetization of rocks: Analysis of results. Dalam: Collinson, D.W., Creer, K.M., dan Runcorn S. K., (eds.), *Methods in Paleomagnetism*, Elsevier, Amsterdam, h.254–286.