



Palinostratigrafi, Paleoekologi dan Paleoklimatologi Plistosen Awal Berdasarkan Studi Palinologi Formasi Pucangan di Daerah Sangiran *Palynostratigraphy, Paleoecology and Paleoclimatology of Early Pleistocene Based on Pollen Study of Pucangan Formation in Sangiran Area*

Eko Yulianto¹, Woro Sri Sukapti², Ruly Setiawan²

¹ Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Jl Sangkuriang Bandung 40135

² Pusat Survei Geologi Badan Geologi, Jalan Diponegoro 57 Bandung 40115

email: ekoy909@gmail.com

Naskah diterima : 23 April 2019, Revisi terakhir : 25 Juni 2019 Disetujui : 25 Juni 2019, Online : 26 Juni 2019

DOI: 10.33332/jgsm.2019.v20.3.133-141p

Abstrak- Studi rekaman polen dan spora telah dilakukan terhadap sampel yang diambil dari Formasi Pucangan, di daerah Sangiran. Studi ini bertujuan untuk mengetahui palinostratigrafi Formasi Pucangan, dinamika lingkungan pada saat Formasi Pucangan diendapkan, dan secara khusus mengetahui pengaruh dari tingginya frekuensi aktivitas vulkanisme selama pengendapan Formasi Pucangan terhadap perubahan bentang vegetasi khususnya di pegunungan. Kehadiran *Phyllocladus hypophyllus* dan *Podocarpus imbricatus* serta posisi stratigrafi Formasi Kabuh yang berumur Plistosen Tengah menunjukkan bahwa profil Formasi Pucangan yang diteliti ini diendapkan pada Kala Plistosen Awal. Seluruh sampel yang dianalisis berada dalam Zona Pucak *Monoporites annulatus* dan terbagi dalam tiga subzona yaitu Subzona Puncak Bersama dari *Polypodisporites radiates*, *Psilotum nudum*, *Magnastriatites grandiosa*, *Cyathea sp.* dan *Laevigatosporites sp.*, Subzona Selang dari dua Subzona Puncak yaitu Subzona Puncak *Polypodisporites radiates*, *Psilotum nudum*, *Magnastriatites grandiosa*, *Cyathea sp.*, *Laevigatosporites sp.* dengan Subzona Puncak *Casuarina sp.*, serta Subzona Puncak *Casuarina sp.*. Di sekitar lingkungan pengendapan Formasi Pucangan pada Kala Plistosen Awal berkembang lingkungan sabana dan secara setempat-setempat lingkungan rawa, sungai dan hutan dataran rendah. Di wilayah-wilayah ketinggian berkembang hutan pegunungan heterogen. Oleh proses regresi, sabana menjadi lebih luas sehingga mengendapkan polen yang lebih banyak ke lingkungan pengendapan Formasi Pucangan. Meningkatnya frekuensi vulkanisme pada saat pengendapan bagian tengah hingga atas dari profil yang diamati mengakibatkan suksesi hutan pegunungan dari hutan heterogen menjadi hutan homogen *Casuarina junghuniana*.

Katakunci: Palinologi, Plistocen Awal, bentang vegetasi, sabana, hutan pegunungan, regresi, vulkanisme.

Abstract- A pollen study has been conducted on samples taken from Pucangan Formation in Sangiran area. This study aims to reconstruct palynostratigraphy and to reveal environmental dynamics along with the deposition of Pucangan Formation with an emphasis on the influence of high frequency volcanism on the vegetational landscape in the montane area. The co-occurrence of *Phyllocladus hypophyllus* and *Podocarpus imbricatus* indicates Plistocene age of samples, and their stratigraphic position overlaid by Middle Pleistocene Kabuh Formation leads to a conclusion of Early Pleistocene. All samples are included in *Monoporites annulatus* Peak Zone and subdivided into three Peak Subzone i.e. *Polypodisporites radiates*, *Psilotum nudum*, *Magnastriatites grandiosa*, *Cyathea sp.* and *Laevigatosporites sp.* Concurrent Peak Subzone, Interval Subzone between two Peak Subzones i.e. *Polypodisporites radiates*, *Psilotum nudum*, *Magnastriatites grandiosa*, *Cyathea sp.*, *Laevigatosporites sp.* Concurrent Peak Subzone and *Casuarina sp.* Peak Subzone. Along with the deposition of Pucangan Formation, savannah with sparse swamp, riparian and lowland forest spreaded out around particularly on lowland, while few mangrove forest grew on muddy sea-land interface environment and heterogenous montane forests occupied highland. During the deposition of stratigraphic profile, savannah got flourished on new emerged land due to regression. Frequent volcanic eruptions along with the deposition of the upper stratigraphic profile has destroyed heterogenous montane forest and led to the homogenous *Casuarina junghuniana* forest.

Keywords: Palynology, Early Pleistocene, vegetational landscape, savannah, montane forest, regression, volcanism.

PENDAHULUAN

Formasi Pucangan sejak lama menjadi perhatian para ahli arkeologi dalam kaitannya dengan fosil manusia purba dan vertebrata, serta menjadi perhatian para ahli geologi beberapa dekade terakhir dalam kaitannya dengan eksplorasi minyak bumi. Formasi Pucangan juga dikenal sebagai Formasi Sangiran sejak publikasi hasil penelitian geologi oleh Watanabe dan Kadar (1985).

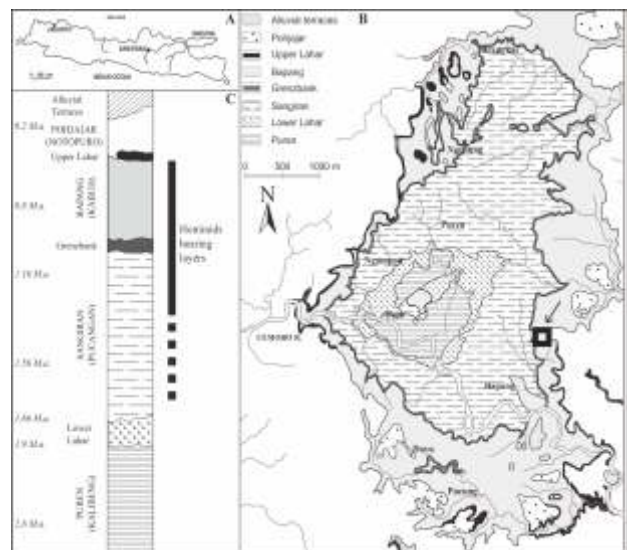
Formasi Pucangan bagian bawah diendapkan di zona air payau hingga sisi dalam teluk pada lingkungan estuari, sementara bagian atasnya diendapkan di lingkungan lakustrin (Itihara *et al.*, 1994; Suzuki *et al.*, 1985; Tipword *et al.*, 1966; Vos and Aziz, 1989). Perubahan lingkungan di Sangiran dari laut dangkal menjadi zona air payau hingga sisi dalam teluk pada lingkungan estuari berkaitan dengan pengendapan aliran bahan rombakan bertipe lahar yang menyusun satuan Lahar Bawah Formasi Pucangan (Bettis *et al.*, 1994). Pengendapan satuan ini diduga sebagai akibat dari runtuhnya tubuh gunungapi yang berada di dekat Sangiran. Runtuhnya tubuh gunungapi ini mungkin dipicu oleh aktivitas vulkanisme dan mengawali proses vulkanisme yang intensif setelahnya terutama bersamaan dengan pengendapan Formasi Pucangan. Hal ini dibuktikan oleh sisipan lapisan tuf yang sangat banyak di dalam Formasi Pucangan. Itihara *et al.*, (1985, 1994), misalnya, mengidentifikasi 12 lapisan tuf di seluruh Formasi Pucangan yang dinamai dengan kode T0 hingga T11. Observasi lebih rinci terhadap Formasi Pucangan bagian atas pada penelitian ini berhasil mengidentifikasi jumlah lapisan tuf yang lebih banyak daripada yang dilakukan Itihara *et al.* (1985, 1994).

Banyaknya lapisan tuf terutama di bagian atas Formasi Pucangan mengindikasikan frekuensi vulkanisme yang tinggi. Aktivitas vulkanisme ini seharusnya mempengaruhi bentang vegetasi di atas daratan yang mengelilingi lingkungan pengendapan Formasi Pucangan setidaknya bentang vegetasi pegunungan. Meskipun Sémah (1982, 1986), Sémah *et al.* (2010, 2012) dan Tokunaga *et al.* (1985) sudah merekonstruksi perubahan bentang vegetasi ini berdasarkan rekaman polen yang terawetkan dalam Formasi Pucangan, mereka tidak melaporkan adanya pengaruh tingginya frekuensi aktivitas vulkanisme terhadap perubahan bentang vegetasi. Palinologi Formasi Pucangan seharusnya merekam dengan baik dinamika bentang vegetasi sebagai respon terhadap aktivitas vulkanisme ini. Penelitian ini secara umum bertujuan untuk

merekonstruksi ulang dinamika bentang vegetasi, paleoekologi dan paleoklimatologi kala Plistosen berdasarkan pada palinologi Formasi Pucangan bagian atas. Lebih dari itu, penelitian ini secara khusus akan merekonstruksi pengaruh tingginya frekuensi aktivitas vulkanisme terhadap perubahan bentang vegetasi pada saat Formasi Pucangan diendapkan.

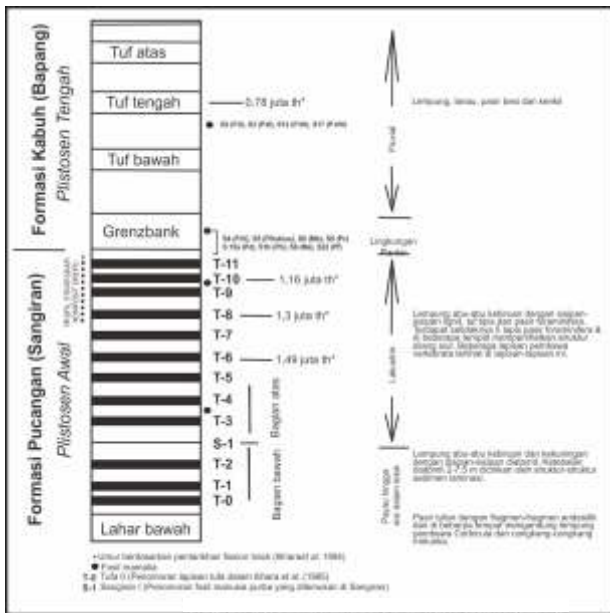
LOKASI DAN METODE PENELITIAN

Secara fisiografi wilayah Sangiran termasuk dalam Zona Kendeng. Formasi Pucangan dan Kabuh yang banyak mengandung fosil hominid dan vertebrata terlampar di Zona Kendeng ini (Van Bemmelen, 1949). Lokasi penelitian berada di wilayah yang secara geomorfologi disebut sebagai Kubah Sangiran (Gambar 1). Tiga buah paritan digali di daerah Drepo pada tiga titik berbeda namun ketiganya memperlihatkan profil stratigrafi yang bersambung satu dengan lainnya mewakili stratigrafi Formasi Pucangan bagian atas. Pengamatan dan deskripsi sedimentologi dan stratigrafi dilakukan di lapangan. Pengamatan lebih seksama dilakukan terhadap lapisan-lapisan tuf. Lapisan tuf paling bawah pada paritan 1 (Tuf A) dikenali sebagai lapisan T8 oleh Watanabe & Kadar (1985). Duapuluh satu sampel diambil untuk analisis polen dan spora dari ketiga paritan pada lapisan lempung berwarna abu-abu-hitam yang diduga banyak mengandung material organik. Dari ketiga profil paritan dibuat profil stratigrafi komposit yang disebut sebagai Profil Stratigrafi Komposit Drepo (Gambar 2).



Sumber : Brasseur *et al.* (2014)

Gambar 1. Peta geologi daerah Sangiran dan sekitarnya. Lokasi penelitian, tempat tiga buah paritan digali berada di daerah Drepo, bujursangkar - tanda panah.



Sumber : dimodifikasi dari Kapid et al (2016)

Gambar 2. Stratigrafi Formasi Pucangan dan Kabuh di daerah Sangiran. Posisi profil stratigrafi komposit Drepo ditandai dengan garis titik-titik pada profil stratigrafi Formasi Pucangan.

Sampel untuk analisis polen diproses dengan metode standar preparasi polen. Beberapa bahan kimia utama digunakan dalam metode standar ini yaitu HF, KOH, HCl, aseton (campuran H₂SO₄ dan (CH₃CO)₂O) dan ZnCl₂. Masing-masing bahan kimia ini berfungsi untuk menghilangkan unsur silikat, asam humat, karbonat, selulosa dan mineral berat. Residu yang telah bersih dari unsur pengotor kemudian ditempelkan di atas kaca preparat untuk dideterminasi kandungan polen dan sporanya di bawah mikroskop. Determinasi dilakukan dengan perbesaran 400x dan 1000x.

Penghitungan polen dan spora yang hadir dilakukan dengan metode aliquot weight. Frekuensi setiap jenis polen dan spora, dan frekuensi kelompok tumbuhan dihitung berdasarkan total butiran polen yang hadir. Hasil determinasi dan penghitungan ditampilkan dalam diagram polen sebagai diagram frekuensi/proporsi. Perubahan proporsi dijadikan dasar untuk menarik batas zona polen. Polen indeks yang hadir digunakan untuk menentukan umur relatif.

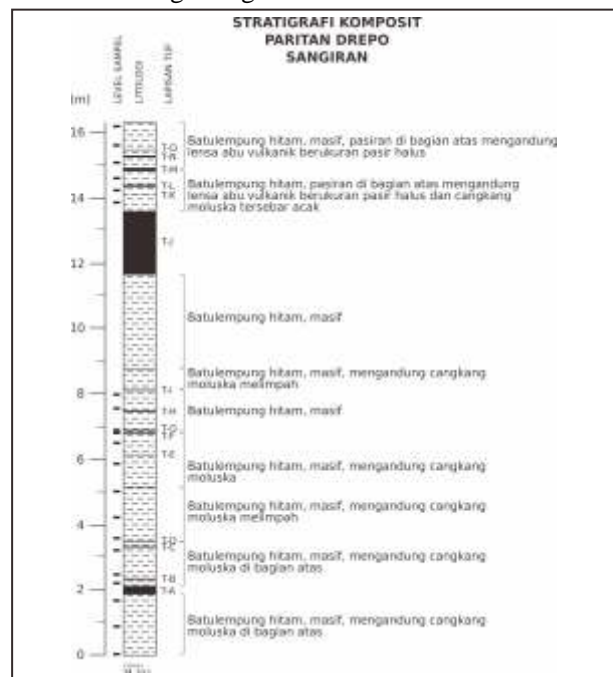
HASIL PENELITIAN

Stratigrafi

Di daerah Sangiran Formasi Pucangan tersusun dari bawah ke atas oleh tiga satuan utama yaitu Breksi Vulkanik Bawah - BVB, Anggota Lempung Diatomik - ALD, dan Anggota Lempung Hitam -ALH (Kadar, 1985). BVB tersusun oleh pasir tufan mengandung

fragmen-fragmen andesitik. Di beberapa tempat dijumpai lapisan lempung mengandung Corbicula dan cangkang moluska. ALD memiliki penyusun utama lempung abu-abu kebiruan dan lempung kekuningan, serta mengandung sisipan-sisipan lapisan diatomit. Lapisan ini kaya dengan foraminifera benthik. Lapisan diatomik memperlihatkan struktur sedimen laminasi dengan ketebalan 2 hingga 7,5 meter. ALH tersusun oleh lempung abu-abu kebiruan, mengandung sisipan-sisipan lignit, tuf tipis dan pasir foraminifera. Di beberapa tempat, satuan ini memperlihatkan struktur sedimen silang siur (Gambar 2).

Profil stratigrafi komposit hasil observasi lapangan untuk penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 3. Total ketebalan profil stratigrafi komposit adalah 16,5 m. Profil ini tersusun terutama oleh lapisan lempung hitam mengandung cangkang moluska dengan sisipan lapisan-lapisan tuf. Lapisan tuf umumnya tipis dan hanya satu lapisan tuf yang memiliki ketebalan hingga 2 meter. Pada bagian tengah hingga atas, lapisan-lapisan tuf menjadi lebih rapat. Limabelas lapisan tuf teridentifikasi di sepanjang profil stratigrafi di tiga paritan yaitu Tuf A hingga Tuf O. Salah satu lapisan tuf yaitu Tuf A diidentifikasi sebagai lapisan Tuf 8 dalam laporan proyek kerjasama Indonesia Jepang CTA-41 (Watanabe & Kadar, 1985). Berdasarkan karakteristik stratigrafi profil komposit ini dan umur dari Tuf A yang analog dengan Tuf 8 yaitu 1,3 juta tahun BP, dapat disimpulkan bahwa profil ini merupakan penyusun dari Formasi Pucangan bagian atas.



Gambar 3. Profil Stratigrafi Komposit Drepo, disusun sebagai gabungan dari 3 profil stratigrafi yang dibuat di daerah penelitian (Drepo).

Diagram Polen

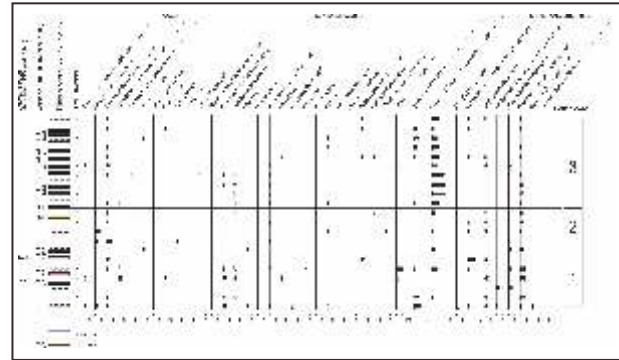
Hasil analisis polen dan spora ditampilkan sebagai diagram polen (Gambar 4). Secara keseluruhan polen dan spora yang hadir dalam ke-21 sampel yang diamati terdiri dari 57 jenis. Hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah total butiran polen di setiap sampel berkisar dari 66 hingga 557 butir. Ada lima sampel yang kandungan polennya kurang dari 100 butir. Proporsi polen lebih tinggi daripada spora di sebagian besar sampel.

Butiran polen yang hadir dalam sampel-sampel itu dapat dikelompokkan ke dalam empat kelompok yaitu Tumbuhan Pantai (*Coast*), Tumbuhan Darat (*Lowland/Peatland* - tumbuhan yang tumbuh di dataran rendah, termasuk ekologi hutan gambut), Tumbuhan Pegunungan (*Montane/Submontane* - tumbuhan yang hidup pada lajur hutan sub-pegunungan hingga pegunungan tinggi), dan Padang Rumput (*Grassland*). Disamping keempat kelompok itu, hadir pula kelompok spora pakis-pakisan (*Pteridophytes*). Keempat kelompok ekologi tersebut terlihat hadir cukup konsisten di semua sampel namun berfluktuasi persentasenya.

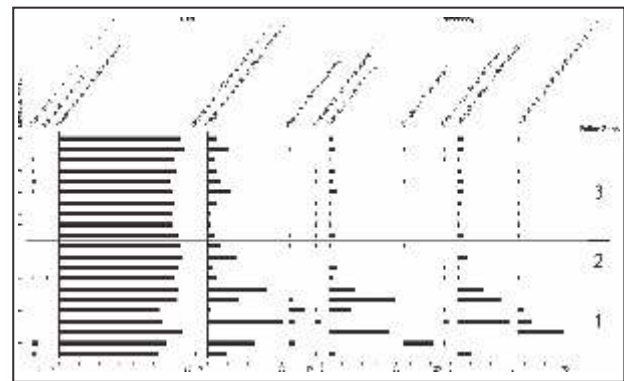
Diantara keempat kelompok ekologi tumbuhan, kelompok padang rumput memiliki persentase yang sangat besar berkisar 74-93% dengan rerata 86%. Kelompok Padang Rumput yang hadir terdiri dari *Cyperaceae*, *Echitricolpites spinosus* (*Asteraceae/Compositae*), *Monoporites annulatus* (*Graminae*) dan *Chenopodipollis* (*Chenopodiaceae*). Kelompok Padang Rumput didominasi oleh *Monoporites annulatus* (*Gramineae*) dengan persentase berkisar 74-93% dengan rerata 85%. Kelompok tumbuhan pantai berkisar 0-12% dengan rerata 4%. Kelompok tumbuhan pantai hanya diwakili oleh empat jenis dengan *Zonocostites ramonae* (*Rhizophora* - bakau) hadir paling dominan masing-masing berkisar antara 0-2% (rerata 0,4%). Kelompok tumbuhan dataran rendah berkisar 1-16% dengan rerata 7%. Kelompok tumbuhan dataran rendah diwakili oleh 25 jenis dengan persentase yang sangat rendah. Di antara jenis polen tumbuhan dataran rendah yang menonjol adalah *Typha* berkisar 0-5% dengan rerata 1,1%. Kelompok tumbuhan pegunungan berkisar 1-13% dengan rerata 7%. Kelompok Pegunungan yang hadir terdiri dari delapan jenis dan didominasi oleh *Casuarina junghuniana* dan *Pinus sp.*

Diagram polen Formasi Pucangan ini dapat dibagi menjadi tiga zona polen. Zona 1 dipisahkan dari Zona 2 dan 3 karena proporsi spora *Pteridophyta*-nya yang

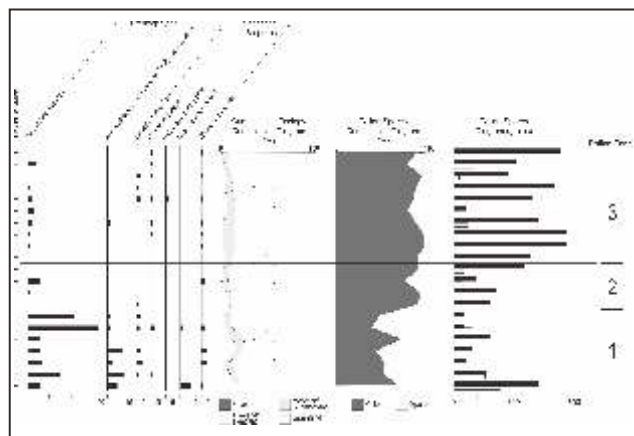
lebih tinggi. Zona 3 dipisahkan dari Zona 1 dan 2 karena proporsi tumbuhan pegunungan khususnya *Casuarina junghuniana* yang lebih tinggi. Selain itu, Zona 1 dicirikan oleh lebih rendahnya jumlah total butiran polen, lebih rendahnya proporsi tumbuhan padang rumput khususnya *Monoporites annulatus* dan tingginya persentase berbagai jenis spora.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Diagram polen dari profil stratigrafi komposit Drepo (a, b, c). Profil stratigrafi yang ditampilkan memperlihatkan posisi-posisi lapisan tuf. Ketebalan lapisan tuf yang ditunjukkan dalam profil ini dibuat tidak dalam skala.

DISKUSI

Umur

Petunjuk umur untuk Formasi Pucangan adalah kehadiran *Podocarpus imbricatus* dan *Phyllocladus hypophyllus*. Kemunculan awal (*first appearance*) dari *Podocarpus imbricatus* terjadi pada Mid-Pliosen, termasuk ke dalam bagian akhir dari Zona *Podocarpus imbricatus/Dacrycarpidites australiensis* dalam Zonasi Palinologi Pulau Jawa yang berumur Pliosen Akhir ke arah Plistosen (Rahardjo *et al.*, 1994). Kehadiran polen ini menunjukkan bahwa profil komposit Formasi Pucangan yang diamati berumur tidak lebih tua dari *Middle* Pliosen. Sementara kemunculan awal (*first appearance*) dari *Phyllocladus hypophyllus* terjadi di Plistosen dan polen ini menjadi fosil indeks Kala Plistosen (Morley, 1991; Rahardjo *et al.*, 1994). Dengan demikian, kehadiran kedua jenis polen ini menunjukkan bahwa profil Formasi Pucangan yang diamati diendapkan pada Kala Plistosen. Secara stratigrafi Formasi Pucangan diendapkan secara selaras di bawah Formasi Kabuh atau Formasi Bapang. Umur dari Formasi Kabuh adalah Plistosen Tengah (Itihara *et al.*, 1985) sehingga dapat disimpulkan bahwa umur dari Formasi Pucangan adalah Plistosen Awal.

Kesimpulan umur Formasi Pucangan berdasarkan polen ini bersesuaian dengan umur absolut hasil pentarikan jejak bilah (*fission-track*) pada lapisan Tuf 8 yang dilaporkan oleh Watanabe dan Kadar (1985). Tuf 8 itu diidentifikasi sebagai Tuf A pada penelitian ini. Menurut Watanabe dan Kadar (1985) umur dari Tuf 8 adalah 1,3 juta tahun BP.

Palinostratigrafi

Dilihat dari karakteristik kandungan polen utamanya, Formasi Pucangan secara keseluruhan dicirikan oleh Zona Puncak *Monoporites annulatus*. Namun zona ini dari tua ke muda dapat dibagi menjadi 3 subzona yaitu Subzona Puncak dari *Polypodisporites radiates*, *Psilotum nudum*, *Magnastriatites grandiosa*, *Cyathea sp.* dan *Laevigatosporites sp.*, Subzona Selang dari dua Subzona Puncak yaitu Subzona Puncak *Polypodisporites radiates*, *Psilotum nudum*, *Magnastriatites grandiosa*, *Cyathea sp.*, *Laevigatosporites sp.* dengan Subzona Puncak *Casuarina sp.*, serta Subzona Puncak *Casuarina sp.*

Paleoekologi

Tingginya proporsi kelompok Tumbuhan Padang Rumput terutama *Monoporites annulatus* (Gramineae)

serta rendahnya total polen non-Tumbuhan Padang Rumput di seluruh sampel mengindikasikan lingkungan hutan terbuka (sabana) berkembang di daratan pada saat sampel-sampel yang dianalisis diendapkan. Studi proporsi polen *Poaceae* dalam lingkungan sabana modern menunjukkan dominasi polen ini di dalam kumpulan polen baik yang terendapkan di daratan maupun yang diendapkan di lingkungan perairan danau (Gosling *et al.*, 2009). Kehadiran polen *mangrove Zonocostites ramonae (Rhizophora)*, dan polen yang memiliki afinitas lingkungan pantai berlumpur seperti *Acanthus* mengindikasikan berkembangnya ekosistem mangrove. Menonjolnya proporsi polen pegunungan mengindikasikan lokasi pengendapan sampel-sampel yang dianalisis berdekatan dengan hutan-hutan pegunungan. Polen memiliki proporsi hampir sebanding dengan spora pada Zona 1 dan lebih tinggi pada Zona 2 dan 3. Hal ini mengindikasikan lingkungan pengendapan sampel-sampel yang dianalisis berada di laut yang berdekatan dengan daratan dan di lingkungan daratan.

Relatif rendahnya kelimpahan polen dan spora, dan proporsi spora yang sedikit lebih tinggi daripada proporsi polen pada Zona 1 mengindikasikan lingkungan pengendapan berada di lingkungan laut dangkal. Di dekatnya, pada lingkungan pantai berlumpur berkembang setempat-setempat. Mangrove dengan komponen utamanya *Zonocostites ramonae/Rhizophora* (bakau). Lingkungan seperti ini biasanya berada di sekitar muara sungai dan/atau di sekeliling lingkungan perairan tertutup yang secara periodik masih dipengaruhi oleh air laut, seperti lingkungan laguna atau teluk.

Sangat menonjolnya proporsi *Monoporites annulatus* menunjukkan berkembangnya ekosistem sabana pada lingkungan dataran rendah di belakang ekosistem mangrove dan hutan pantai. Sedikit tegakan-tegakan tumbuhan hutan dataran rendah/peatland hadir di dalam sabana ditunjukkan oleh kehadiran polen-polen tumbuhan dataran rendah. Hadirnya *Typha* dengan proporsi cukup menonjol mengindikasikan berkembangnya rawa-rawa di dalam ekosistem sabana, mungkin di sepanjang alur-alur sungai.

Besarnya proporsi polen Tumbuhan Pegunungan terutama *Podocarpidites (Podocarpus)*, *Pinuspollenites (Pinus)* dan *Dacrycarpus* di Zona 1 mengindikasikan menonjolnya proporsi tumbuhan penghasil polen-polen ini di hutan pegunungan di sekeliling lingkungan pengendapan. Besarnya proporsi ini juga mengindikasikan relatif dekatnya jarak dari hutan

pegunungan ke lingkungan pengendapan sampel-sampel yang dianalisis. Selain itu, besarnya proporsi polen pegunungan juga mengindikasikan intensifnya proses transportasi polen-polen itu ke lingkungan pengendapannya. Tingginya intensitas transportasi polen pegunungan diduga berkaitan dengan adanya alur-alur sungai yang berhulu di wilayah hutan pegunungan dan bermuara Sangiran. Beberapa sungai yang berhulu di daerah pegunungan memungkinkan proses transportasi polen-polen pegunungan menjadi lebih efektif dari wilayah pegunungan ke lingkungan pengendapannya yaitu di lingkungan laut dangkal. Polen *Gymnosperma* terbukti dapat disebarkan secara efektif oleh air melalui aliran sungai ke lingkungan pengendapannya (Morley, 1982).

Peningkatan proporsi polen yang terjadi di Zona 2 dan 3 dipicu oleh peningkatan polen *Monoporites annulatus*/Gramineae (rumput-rumputan) dan penurunan spora *Pteridophyta* (pakis-pakistan). Pada Zona 3, peningkatan proporsi polen juga dipicu oleh peningkatan proporsi *Casuarina* secara signifikan. Lebih tingginya proporsi polen dibandingkan proporsi spora mengindikasikan lingkungan pengendapan sudah berada di lingkungan daratan pada saat Zona 2 dan 3 diendapkan. Peningkatan proporsi *Monoporites annulatus* mungkin mengindikasikan berkembangnya lingkungan yang lebih terbuka daripada saat Zona 1 diendapkan. Hal ini mengindikasikan terjadinya proses regresi sehingga mengakibatkan perubahan lingkungan pengendapan cukup signifikan dari lingkungan laut dangkal (Zona 1) menjadi dataran pantai (Zona 2 dan 3). Perubahan bentang vegetasi terjadi secara berangsur mengikuti proses regresi ini. Daratan-daratan baru yang muncul kemudian dikolonisasi oleh *Monoporites annulatus* sehingga memperluas bentang vegetasi sabana yang sebelumnya sudah ada.

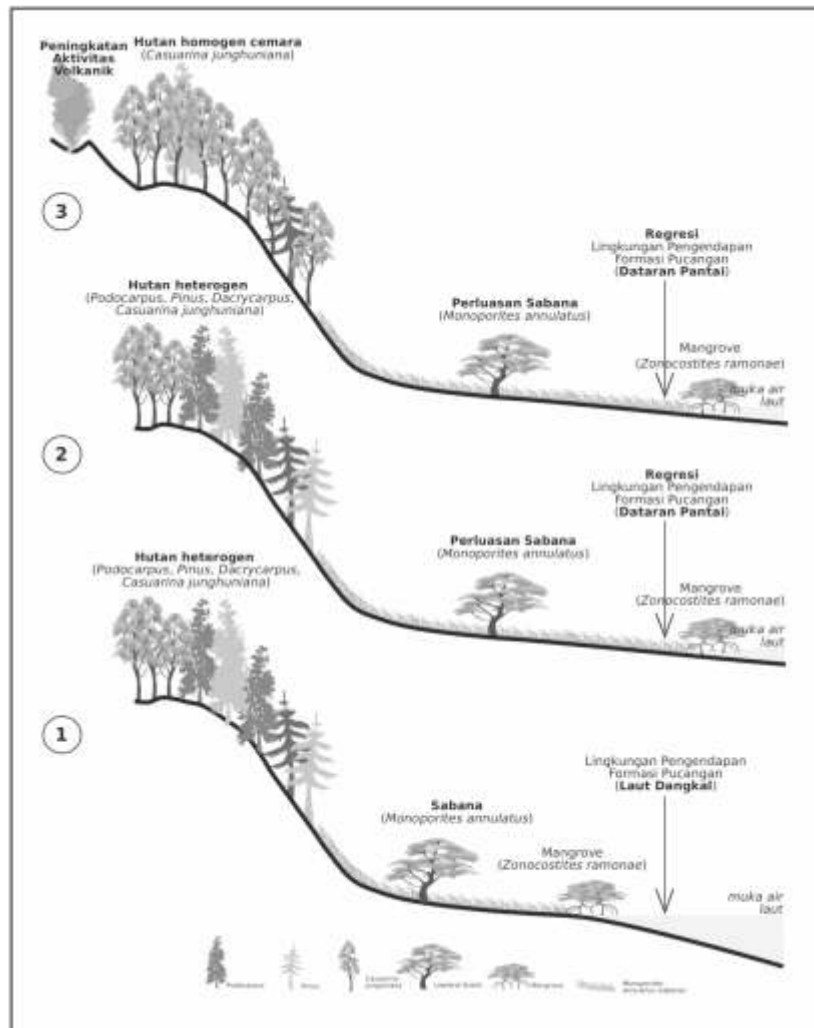
Peningkatan proporsi *Casuarina sp.* menjadi penanda yang jelas pemisahan Zona 3 dari Zona 2. Ini terjadi bersamaan dengan penurunan proporsi polen-polen pegunungan. Kehadiran polen *Casuarina sp.* (cemara) dapat bersumber dari *Casuarina junghuniana* dan/atau *Casuarina equisetifolia*. *C. junghuniana* dan *C. equisetifolia* merupakan species asli (*native*) Indonesia. *C. junghuniana* secara alami tumbuh pada ketinggian 550-3100 m dpl dengan suhu harian berkisar 13-28°C dengan curah hujan tahunan 700-2000 mm, pada tanah asam hingga basa (pH 2,8-8) baik tanah vulkanik, tanah pasir maupun tanah lempung (Orwa *et al.*, 2009).

Spesies ini merupakan tumbuhan pioneer untuk hutan yang tidak terganggu maupun yang terganggu pada wilayah beriklim monsoon. *Casuarina junghuniana* juga merupakan spesies yang toleran terhadap kekeringan jangka panjang karena kemampuannya bertahan pada keadaan yang kurang oksigen. Pohon yang sudah mencapai beberapa meter memiliki karakter tahan api dan mampu berbiak vegetatif secara seketika dengan sprouting sehabis terbakar (Orwa *et al.*, 2009). *C. equisetifolia* secara alami tumbuh pada ketinggian 0-1400 m pada lingkungan semi-arid hingga subhumid dengan curah hujan tahunan 200-3500 mm. Spesies ini pada umumnya tumbuh di atas lajur sempit di dekat pantai berpasir seperti pada gumuk-gumuk pasir, pasir sepanjang mulut sungai dan pada gumuk depan (*fore-dunes*) dan lereng landai di dekat laut (Orwa *et al.*, 2009).

Peningkatan proporsi polen *Casuarina sp.* pada Zona 3 terjadi bersamaan dengan peningkatan aktivitas vulkanisme yang ditunjukkan oleh kehadiran 10 lapisan tuf dari T-F hingga T-O. Jika diperhatikan lebih seksama, kehadiran polen *Casuarina sp.* di Zona 1 dan 2 boleh jadi juga berkaitan dengan aktivitas vulkanisme. Dengan demikian *Casuarina sp.* yang hadir dalam sampel-sampel yang dianalisis kemungkinan adalah *Casuarina junghuniana*, bukan *Casuarina equisetifolia*. Frekuensi erupsi yang meningkat ketika sampel-sampel Zona 3 diendapkan memfasilitasi peningkatan proporsi *Casuarina junghuniana* di hutan-hutan pegunungan yang rusak akibat erupsi. Pada sisi lain, aktivitas vulkanisme yang merusak hutan pegunungan ini juga mengakibatkan berkurangnya proporsi spesies-spesies hutan pegunungan lainnya. Evolusi perubahan lingkungan ditampilkan sebagai model pada Gambar 5.

Paleoklimatologi

Tingginya proporsi polen *Monoporites annulatus* di seluruh sampel menunjukkan ekosistem sabana berkembang secara luas. Ekosistem sabana berkembang di wilayah dengan kelembaban rendah (kering) dengan curah hujan rendah yang mungkin berasosiasi dengan periode berkembangnya zaman pengesan (glasial). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa selama pengendapan sampel-sampel ini, di daerah Sangiran berkembang iklim dengan kelembaban dan curah hujan rendah serta suhu yang rendah, yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kondisi Sangiran saat ini.



Gambar 5. Model perubahan lingkungan yang terjadi selama pengendapan Profil Stratigrafi Komposit Drepo berdasarkan analisis palinologi: (1) Lingkungan pengendapan Formasi Pucangan adalah laut dangkal. Di sekelilingnya berkembang lingkungan sabana dengan lingkungan rawa, riparian dan ekosistem hutan dataran rendah ada di dalamnya. Di lingkungan antarmuka darat dan laut berkembang ekosistem mangrove, dan di daerah pegunungan berkembang hutan heterogen pegunungan; (2) Proses regresi terjadi sehingga memunculkan daratan-daratan baru yang meluaskan lingkungan sabana; (3) Peningkatan aktivitas merusakan hutan pegunungan heterogen dan digantikan oleh hutan pegunungan homogen *Casuarina junghuniana*.

KESIMPULAN

Analisis polen dan spora telah dilakukan terhadap 21 sampel yang diambil dari Formasi Pucangan, di daerah Sangiran. Berdasarkan kehadiran *Phyllocladus hypophyllus* dan *Podocarpus imbricatus* serta posisi stratigrafi Formasi Kabuh yang berumur Plistosen Tengah maka dapat disimpulkan bahwa profil Formasi Pucangan yang diteliti ini diendapkan pada Kala Plistosen Awal. Profil setebal 16,5 m ini terbagi menjadi 2 berdasarkan lingkungan pengendapannya. Bagian bawah diendapkan di lingkungan laut dangkal dan bagian atas diendapkan di lingkungan perairan darat.

Ekosistem utama yang berkembang di sekitar lingkungan pengendapan ini adalah lingkungan sabana dan di dalamnya berkembang secara setempat-setempat lingkungan rawa dan hutan dataran rendah. Di wilayah-wilayah ketinggian berkembang hutan pegunungan. Dinamika hutan pegunungan terjadi sebagai akibat meningkatnya frekuensi vulkanisme pada saat pengendapan bagian tengah hingga atas dari profil yang diamati. Erupsi-erupsi tersebut merusak hutan heterogen pegunungan yang tersusun terutama oleh *Podocarpus*, *Dacrycarpus* dan *Pinus* memberikan jalan bagi meluasnya hutan homogen cemara (*Casuarina junghuniana*) di wilayah-wilayah pegunungan.

ACUAN

- Bettis (III), E.A., Zaim, Y., Larick, R.R., Ciochon, R.L., Suminto, Rizal, Y., Reagan, M., Heizler, M. 2004. *Landscape development preceding Homo erectus immigration into Central Java, Indonesia: the Sangiran Formation Lower Lahar*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology – Volume 206 (12), 115-131.
- Bettis (III), E.A., Milius, A.K., Carpenter, S.J., Larick, R., Zaim, Y., Rizal, Y., Ciochon, R.L., Tassier-Surine, S.A., Murray, D. 2009. *Way out of Africa: Early Pleistocene paleoenvironments inhabited by Homo erectus in Sangiran, Java*. Journal of Human Evolution 56, 11–24.
- Brasseur, B., Semah, F., Semah, A.M., Djubiantono, T., 2014. *Pedo-sedimentary dynamics of the Sangiran dome hominid bearing layers (Early to Middle Pleistocene, central Java, Indonesia): a palaeopedological approach for reconstructing Pithecanthropus (Javanese Homo erectus) palaeoenvironment*. Quaternary International.
- Gosling, W.D., Francis, E., Mayle, N.J., Tate, T., Killeen, J. 2009. *Differentiation between Neotropical rainforest, dry forest, and savannah ecosystems by their modern pollen spectra and implications for the fossil pollen record*. Review of Palaeobotany and Palynology 153, 70-85.
- Itihara, M., Sudijono, D., Kadar, T., Shibasaki, H., Kumai, S., Yoshikawa, F., Aziz, T., Soeradi, Wikarno, A.P., Kadar, F., Hasibuan, Y., Kagemori. 1985. *Geology and Stratigraphy of the Sangiran area*. In: 1985. Quaternary Geology of the Hominid Fossil Bearing Formation in Java. Eds. Watanabe, N. & Kadar, D. Geological Research and Development Center (GRDC), Special Publication No. 4, 11-43.
- Itihara, M., Watanabe, N., Kadar, D., Kumai, H. 1994. *Quaternary stratigraphy of the hominid fossil bearing formations in the Sangiran area, Central Java*. Courier Forschungs-Institut Senckenberg 171, 123–128.
- Kadar, D. 1985. *Upper Cenozoic foraminiferal biostratigraphy of the Kalibeng & Pucangan formations in the Sangiran dome area, Central Java*. In: Naotune W, Darwin K, editors. Quaternary geology of the hominid fossils bearing formations in Java. Special publication no.4. Geological Research and Development Centre, Bandung, p.219–241.
- Kapid, R., Arif, J., Irawan, D.E. 2016. A review on paleoenvironment suitability for hominid fossils and other early vertebrate faunas: a case from Pucangan and Kabuh Formations, Central and East Java, Indonesia. Science Open Resource, 1-7. DOI: 10.14293/S2199-1006.1.SOR-LIFE.AH9PUY.v1
- Morley, R.J. 1991. *Tertiary Stratigraphic Palynology in Southeast Asia Current Status and New Direction*. Geol. Soc. Malaysia Bulletin Lemigas, Jakarta. p. 1-10.
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt R., Jamnadass, R., Anthony, S. 2009. *Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0* (<http://www.worldagroforestry.org/sites/treedbs/treedatabases.asp>)
- Rahardjo, A.T. dan Sémah, A.M. 1983. *Penelitian palynology daerah Sangiran*. Bull Depart Geol – Bandung Inst Technol. 9, 23–31.
- Rahardjo, A.T., Polhaupessy, T.T., Wiyono, S., Nugrahaningsih, H., Lelono, E.B. 1994. Zonasi Polen Tersier Pulau Jawa. *Makalah Ikatan Ahli Geologi Indonesia*, Desember 1994, 77- 84.
- Sémah, A.M., 1982. *A Preliminary Report On A Sangiran Pollen Diagram*. Modern Quaternary Research in Southeast Asia. Vol 7. A.A. Balkema Publishers. Groningen. p. 11-13.
- Sémah A.M, Sémah, F., Djubiantono, T., Brasseur, B. 2010. *Landscapes and hominid's environments: changes between the lower and early middle Pleistocene in Java (Indonesia)*. Quaternary Int 223, 451-454.
- Sémah A.M. dan Sémah, F. 2012. *The rain forest in Java through the Quaternary and its relationships with humans (adaptation, exploitation and impact on the forest)*. Quaternary Int 249, 120-128.
- Suzuki, M., Wikarno, Santoso, B., Saefudin, I., Itihara, M. 1985. *Fission track ages of pumice tuff, tuff layers and javites of hominid fossil bearing formations in Sangiran area, Central Java*. In: Naotune W, Darwin K, editors. Quaternary geology of the hominid fossils bearing formations in Java. Special publication no.4. Geological Research and Development Centre, Bandung, p. 309–357.

- Tipsword, H.L., Setzer, F.M., Smith, F.L. 1966. *Interpretation of depositional environment in gulf coast petroleum exploration from paleo-ecology and related stratigraphy*. Transaction-Gulf Coast Assoc Geol Soc. 16, 119–130.
- Tokunaga, S., Oshima, H., Polhaupessy, A.A., Ito, Y. 1985. *A palynological study of the Pucangan and Kabuh Formations in the Sangiran area*. Geology and stratigraphy of the Sangiran area. Quarternary Geology of the Hominid, Volume 63.
- Van Bemmelen, R.W. 1949. *The geology of Indonesia*. The Hague (Gov. Print. Office), The Netherlands.
- Watanabe, N. dan Kadar, D. 1985. *Quaternary geology of the hominid fossil bearing formations in Java, Report of the Indonesia-Japan Joint Research Project CTA-41, 1976-1979*. Geol.Res.Dev.Centre, Special Publication. 4, 1-378.
-