

Tinjauan hubungan formasi batuan sedimen dengan iklim Contoh kasus: endapan teras Bengawan Solo dan *red beds* di Cekungan Sumatra Tengah

Danny Z. Herman

Badan Geologi

Jln. Diponegoro 57 Bandung 40122

SARI

Di daerah beriklim tropis ketika curah hujan musiman berlangsung secara maksimum, akan terjadi *discharge* sedimen sangat tinggi sehingga menghasilkan endapan-endapan sedimen dataran banjir. Gosong meander sungai merupakan salah satunya dan melalui proses pengangkatan akan membentuk endapan teras. Banjir purba di sepanjang Bengawan Solo diyakini terjadi karena besarnya pasokan air yang disebabkan peningkatan curah hujan. Sedimen-sedimen gosong yang dikenal sebagai teras Bengawan Solo, merupakan salah satu di antara jenis-jenis sedimen lainnya hasil pengendapan kegiatan tersebut. Endapan teras Bengawan Solo merupakan salah satu rekaman geologi penting yang dapat digunakan sebagai indikator untuk memahami keterkaitan pembentukannya dengan iklim setempat pada masa lampau. Peningkatan curah hujan pada periode antara Plistosen Awal hingga Sub-Resen diduga menjadi penyebab berlimpahnya pasokan air pada saluran sungai yang pada gilirannya mengakibatkan banjir di sepanjang Bengawan Solo. Rekaman geologi penting lain yang ditemukan di cekungan-cekungan busur belakang Sumatra Tengah, yang dikenal sebagai formasi sedimen fluvial/lakustrin "*Red Beds*" diendapkan pada periode Eosen – Oligosen. Penemuan tersebut mengarah pada dugaan bahwa proses sedimentasi berimplikasi dipengaruhi oleh iklim tropis panas-kering. Kondisi iklim selama periode tersebut diduga menjadi penyebab terbentuknya pigmen berwarna coklat-merah (hematit), yang diakibatkan oleh proses ubahan in-situ dari oksida besi yang terhidrasi, berasal dari oksidasi mineral-mineral silikat ferromagnesian dan magnetit yang merupakan komponen-komponen sedimen lakustrin di cekungan Sumatra Tengah.

Kata kunci: iklim tropis, curah hujan, endapan teras, panas-kering, endapan *Red Beds*

ABSTRACT

In tropical climate areas when the seasonal rainfall takes place in a maximum intensity, the highest rate of sediment discharge will occur; the floodplain deposits are formed. Point bar of river meander is one of those deposits and through an uplift process will form terrace deposit. Ancient flooding along the Bengawan Solo was believed to occur due to the large intake of water supply caused by increased rainfall. Point bars known as the Bengawan Solo terrace is one among other types of sediment deposition result of these activities. The Bengawan Solo River terrace is one of the important geological record that can

Naskah diterima 18 April 2011, selesai direvisi 13 Juli 2011
Korespondensi, email: abi_aizar@yahoo.com

be used as an indicator to understand the interrelatedness of its formation with the local climate in the past. The increase in rainfall intensity in the periode of Early Pleistocene until Sub-Recent suspected as the cause of the abundance of water supply in the river channel which in turn resulted in flooding along the Bengawan Solo. Other important geological records found in the back-arc basin of Central Sumatra, which is known as fluvial sedimentary formations/lakustrin "Red Beds" was deposited during the Eocene-Oligocene period. The discovery led to the conjecture that the implications of sedimentation process was affected by the hot-dry tropical climate. The climatic conditions during this period is thought to be the cause of the formation of brown-red color (hematite). Hematite may be formed as the product of in-situ alteration process of hydrated Fe-oxides originating from ferromagnesian silicate minerals and magnetite of the lacustrine sediments in Central Sumatra basin.

Keywords: *tropical climate, precipitation, terrace deposit, hot-dry, Red-Beds deposit*

PENDAHULUAN

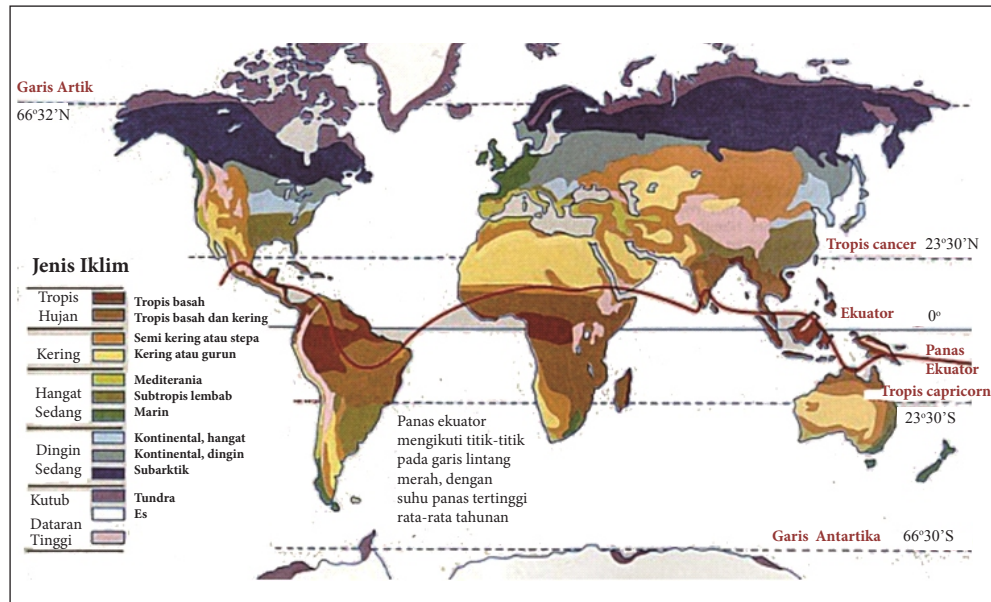
Perubahan iklim adalah perubahan statistik distribusi pola-pola cuaca berjangka panjang selama kisaran periode dekade hingga jutaan tahun. Perubahan dapat terjadi secara rata-rata atau berupa perubahan distribusi cuaca dibandingkan terhadap kondisi cuaca rata-rata, dalam artian lebih kerap atau lebih sedikit terjadinya perubahan tersebut (Houghton, 2001).

Bukti-bukti perubahan iklim dapat diperoleh dari beberapa sumber yang dapat digunakan untuk merekonstruksi iklim-iklim di masa lalu. Dari sebagian besar bukti tidak langsung menunjukkan bahwa yang mencerminkan perubahan-perubahan iklim antara lain vegetasi, inti-es, perubahan muka air laut dan glasiasi. Selain bukti-bukti di atas, sedimen-sedimen terlaminaasi juga sering digunakan untuk memperkirakan perubahan iklim berjangka pendek, sepanjang setiap laminaasi tersusun oleh sedimen yang diendapkan pada kondisi unik.

PEMBAGIAN IKLIM DI DUNIA

Pembagian iklim di dunia berdasarkan kenampakan rata-rata, ekstrim dan frekuensi unsur meteorologi yang terdiri atas suhu, tekanan atmosfer, curah hujan, angin, kelembaban, dan sinar matahari (Gambar 1; Kemp, 1996).

1. Iklim kutub (*Polar Climates*) ditandai oleh musim dingin yang berlangsung lama sedangkan musim panas berlangsung singkat, udara kering, tanah selalu membeku sepanjang tahun, suhu $< 6^{\circ}\text{C}$ selama > 6 bulan dengan suhu minimum bulanan $- 30^{\circ}\text{C}$, angin dingin bertiup kuat, tanah ditutupi es di musim dingin, terbentuk rawa yang luas di musim panas akibat mencairnya es.
2. Iklim dingin sedang (*Cold Temperate Climates*) terdiri atas iklim subartik, kontinental dingin dan kontinental hangat. Subartik berciri musim dingin yang bersuhu sangat rendah, musim panas singkat dan turunnya hujan terutama di musim panas. Kontinental dingin dicerminkan



Gambar 1. Peta Pembagian Iklim Dunia (Modifikasi dari Kemp, 1996).

oleh lebarnya kisaran suhu tahunan, curah hujan tahunan yang rendah dan musim panas bersuhu agak tinggi. Kontinental panas berciri hampir sama dengan kontinental dingin, hanya musim panas yang bersuhu agak dingin.

- Iklim hangat sedang (*Warm Temperate Climates*) terbagi atas iklim mediteranian dan margin. Mediteranian berciri iklim panas, musim panas kering dan hangat, musim dingin basah. Margin didominasi oleh monsoon, suhu panas sepanjang tahun dengan curah hujan tahunan lebih tinggi.
- Iklim tropis dibagi menjadi ekuatorial, kontinental tropis dan gurun. Ekuatorial dicirikan oleh suhu tinggi dan konstan sepanjang tahun, curah hujan tahunan >2000 mm dengan hujan deras, kelem-

baban tinggi sepanjang hari dan variasi angin ringan. Kontinental tropis berciri suhu tinggi sepanjang tahun, sedikit lebih dingin dan lebih tingginya kisaran suhu tahunan daripada iklim ekuatorial, penampakan iklim terutama ditunjukkan oleh pergantian musim basah dan kering. Iklim gurun ditandai oleh suhu ekstrim dengan seringnya bersuhu 20 – 30°C dalam setahun, dan mencapai 50°C di siang hari. Suhu berbeda pada malam hari hingga < 0°C, hujan deras hanya turun satu kali dalam dua atau tiga tahun.

FORMASI BATUAN SEDIMEN SEBAGAI INDIKATOR PERUBAHAN IKLIM

Formasi-formasi stratigrafi sedimen di seluruh wilayah Indonesia diyakini memiliki

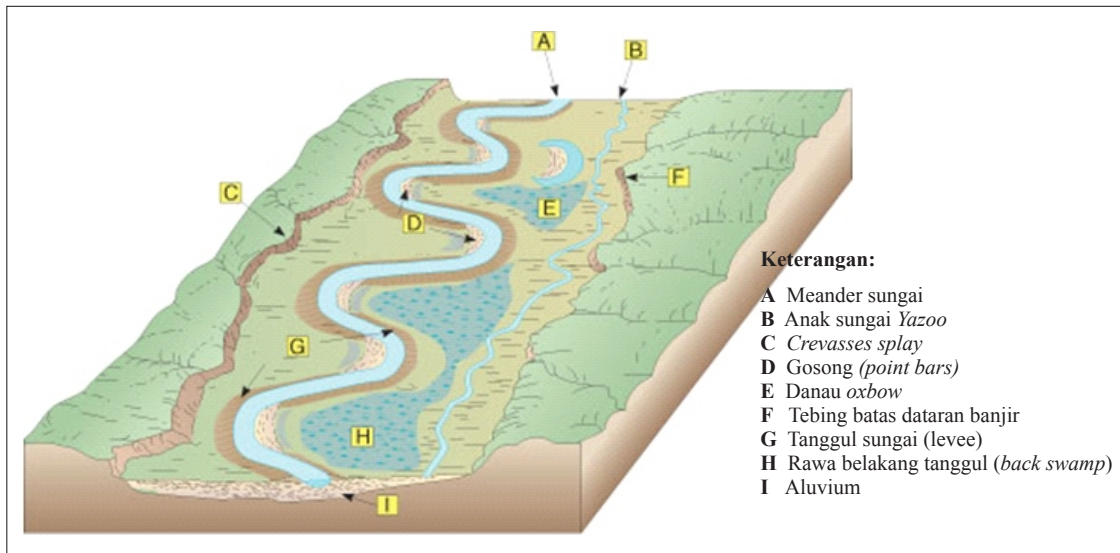
karakteristik pembentukan yang dipengaruhi iklim tropis, dan hubungan keduanya dapat ditafsirkan dengan mempelajari serta memahami proses sedimentasi, di antaranya yang terkait: *discharge* sedimen fluvial, jenis sedimen yang dihasilkan, dan tidak kalah penting kemungkinan pembentukan pigmen pada sedimen.

Discharge sedimen dalam sistem fluvial merupakan fungsi iklim. Di daerah beriklim tropis ketika curah hujan musiman berlangsung secara maksimum, akan terjadi *discharge* sedimen sangat tinggi seperti yang ditunjukkan oleh bahan-bahan endapan dataran banjir (*flood-plains*) atau meander dan sungai teranyam (*braided-stream*). Keduanya terbentuk ketika sungai dalam keadaan banjir atau karena besarnya influks air yang disebabkan oleh tingginya curah hujan (Friedman and Sanders, 1978).

Peningkatan aliran sungai dari cabang-cabang ke sungai-sungai utama dapat menyebabkan limpahan air dengan kecepatan berlebihan pada saluran-saluran sungai. Selama melewati saluran, air pada kondisi lebih dalam dan mengalir lebih cepat dibandingkan dengan ketika berupa aliran dasarnya. Saluran air bertambah dalam akibat penambahan air di bagian atasnya dan juga karena terbawanya sedimen dari bagian dasarnya. Diyakini bahwa sedimen-sedimen bertambah dan sebagian mengalami suspensi dan turbulensi. Pada sungai-sungai yang berkembang menjadi meander, banjir cenderung menggerus kelokan-kelokan sungai dan mengisi daerah-daerah *cross over*. Ketika banjir surut, aliran air mengisi kelokan meander dan mengerosi daerah-daerah *crossover*. Dalam jangka waktu lama,

apabila endapan-endapan sedimen menjadi berlimpah maka akan membentuk pulau-pulau yang memisahkan aliran air menjadi menyerupai anyaman sehingga disebut sungai teranyam (*braided*) (Friedman and Sanders, 1978).

Beberapa unsur di dalam sistem meander meliputi dataran banjir (*floodplain*), tanggul (*levee*), rawa-rawa belakang tanggul (*back swamp*), gosong (*point bar*), danau *oxbow* dan *crevasses splay* (Gambar 2). Endapan dataran banjir biasanya didominasi oleh endapan suspensi berupa lanau dan lumpur, meskipun kadang-kadang disertai batupasir halus yang diendapkan oleh arus lebih kuat pada saat puncak banjir. Tanggul terbentuk pada saat banjir berarus sedang yang hanya mencapai ketinggian sama dengan tebing sungai. Dengan menurunnya kecepatan arus, maka diendapkanlah sedimen di sepanjang tebing sungai tersebut. Terjadinya banjir berulang-ulang akan membentuk tanggul yang semakin tinggi terdiri atas endapan sedimen berbutir halus, dan tinggi maksimum yang terjadi mengindikasikan permukaan air maksimum pada saat banjir. Daerah depresi di belakang tanggul ini biasanya merupakan rawa-rawa (*back swamp*) tempat pengendapan lapisan lanau dan lempung. Endapan gosong terakumulasi pada sisi dalam kelokan sungai, merupakan akumulasi bahan-bahan rombakan hasil erosi sisi luar tebing sungai; dengan tekstur endapan berukuran menghalus ke atas (*graded*) dan berstruktur silang siur. Pada sungai meander tua, gosong-gosong tersebut dapat terpotong kembali oleh aliran berarus kuat dari banjir selanjutnya. Proses pengikisan mendatar yang berkesinambungan



Gambar 2. Sketsa daerah dataran banjir (*floodplain*) dan endapan-endapan sedimen (Modifikasi dari Lemke and Heywood, 2009).

pada kelokan sungai meander dapat menghasilkan pengendapan sedimen di sisi lain dan mengakibatkan putusnya aliran sungai untuk membentuk danau *oxbow*. *Crevasse splay* adalah sedimen yang diendapkan ketika air melimpah di sisi kiri dan kanan sungai berupa endapan bertekstur klastika berbutir menghalus ke atas dan berstruktur horizontal *ripple cross bedding* (Friedman and Sanders, 1978).

Sungai teranyam umumnya terbentuk di daerah-daerah dengan kemiringan lereng menengah - tinggi dan di dalam saluran-saluran sungainya berkembang endapan bar longitudinal berukuran butir semakin halus ke bagian bawahnya. Sekuen vertikal endapan sungai ini disusun oleh sebagian besar pasir dan kerikil, dengan sedikit atau absen lapisan lumpur.

Sedimentasi sungai teranyam dimulai dengan rombakan hasil penggerusan dan konsentrat

berukuran butir kasar, terdiri atas pasir dan kerikil yang terakumulasi karena kondisi aliran dangkal di bagian atas regim aliran sehingga membentuk gelombang-gelombang pasir. Ketika arus sungai melemah dan air berkurang, sedimen berukuran lebih halus diendapkan di bagian top sekuen untuk melengkapi bagian butiran halus ke arah atas yang merupakan bagian dari lapisan bersusun (*graded*). Namun endapan sedimen ini jarang terbentuk karena disapu oleh banjir berikutnya.

Berlimpahnya curah hujan diperlukan untuk kelangsungan hidup vegetasi, maka kekurangan hujan yang berkelanjutan akan mengakibatkan keringnya suatu daerah, dan akhirnya berujung pada pembentukan gurun. Gurun mempunyai konotasi daerah bervegetasi semak, rendah curah hujan (25 - 50 cm/tahun) dan proporsi evaporasi yang tinggi. Batuan dasar yang tersingkap meliputi > 50% dari

seluruh daerah gurun, kira-kira $\frac{1}{4}$ dari permukaannya ditutupi oleh sedimen terpilah buruk. Diperkirakan 20% dari total daerah gurun di dunia dilandasi oleh pasir lepas, berupa akumulasi gosong pasir. Lebih banyak hasil rombakan lepas maka akan lebih mudah angin atau air mentransportasinya. Sedimen-sedimen berukuran seperti pasir halus, lanau dan lempung dipindahkan oleh angin jauh dari tempat asalnya, kemudian terakumulasi sebagai gosong-gosong pasir yang diendapkan di balik ongkongan kerikil dan pasir kasar. Endapan-endapan sedimen di lingkungan gurun termasuk kipas aluvium, sungai-sungai intermiten, gosong pasir dan danau *ephemeral* (Friedman and Sanders, 1978).

Kipas aluvium adalah endapan-endapan sedimen dengan permukaan berupa segmen kerucut dan tersebar secara *radiate* ke arah bawah lereng di sepanjang suatu daerah jurang sesar atau lereng terjal, tempat sungai-sungai muncul dari dataran tinggi berbatu. Endapan-endapan ini terbentuk melalui mekanisme transportasi: aliran air sungai (*stream flow*), aliran rombakan (*debris flow*), dan aliran lumpur (*mud flow*).

Aliran air sungai dapat mengendapkan sedimen lanau, pasir dan kerikil dengan sedikit lempung; tersebar oleh jaringan sungai-sungai teranyam. Melebarnya aliran ke arah bagian dangkal, berkurangnya air dan cepatnya arus air dapat menghasilkan endapan pasir dan kerikil terpilah baik dengan struktur perlapisan stratifikasi silang-siur atau horisontal hingga laminasi atau lapisan-lapisan tebal.

Ketika air mengalir melalui kipas dan tercampur sedimen lain maka terjadi peningkatan

densitas dan viskositas campurannya, mengubah alirannya menjadi lebih bersifat massa plastis sehingga disebut aliran debris. Endapan yang terbentuk berupa sedimen terpilah buruk atau tidak terpilah dan berbutir kasar, termasuk kerakal dan bongkah yang berada dalam matriks lumpur. Sementara aliran lumpur hampir sama dengan aliran debris, tetapi dengan dominan lumpur dan di dalamnya mengandung partikel-partikel berukuran pasir dan lebih halus lagi (umumnya mengandung $\geq 25\%$ partikel berukuran lempung).

Proporsi mekanisme transportasi sedimen yang membentuk kipas tersebut beragam tergantung jumlah, frekuensi dan intensitas hujan. Pada umumnya, endapan kipas pada wilayah beriklim lebih kering lebih didominasi oleh aliran debris dan lumpur. Sedangkan di wilayah beriklim lembab, endapan kipas terbentuk oleh aliran sungai.

Beberapa penampakan gurun ditunjukkan oleh keberadaan sungai-sungai yang hampir setiap waktu dalam keadaan kering, hanya diisi air ketika terjadi hujan sehingga biasa disebut sungai intermiten. Selama periode hujan; air sungai mengalir deras untuk mengerosi, mentransportasi dan mengendapkan sedimen berjumlah besar. Sedimen yang terbentuk dapat mencapai panjang beratus-ratus kilometer dan beberapa kilometer lebar. Sedimen berukuran halus tersebar, karena: tingkat energi air sungai mentransportasi beban berukuran kasar; banjir berikutnya memusnahkan sedimen berukuran halus hasil pengendapan banjir sebelumnya; dan endapan sedimen berukuran halus tertiup angin selama periode kering setelah peristiwa banjir, jauh dari tempat pengendapannya. Jenis sedimen yang

terbentuk berupa batupasir berukuran kasar dan berstruktur silang-siur, dengan debris berukuran kasar berkisar dari terpilah baik pada endapan aliran sungai hingga terpilah buruk pada endapan aliran debris.

Danau ephemeral adalah danau yang terbentuk dalam waktu singkat di daerah gurun atau daerah beriklim panas dan hujan hanya terjadi sesekali dalam setahun. Danau ini terdiri atas sabkha dan playa. Endapan sabkha terbentuk di antara dua gosong pasir, hasil pengendapan oleh sungai-sungai intermiten dan oleh angin. Terdapat dua jenis endapan ini, yaitu shabka pantai dan benua. Jenis pertama merupakan bagian dari hasil pengendapan pantai dan darat, terdiri atas sedimen karbonat terutama aragonit. Gypsum diendapkan luas, kemudian dilarutkan ulang, bermigrasi dan diendapkan kembali sebagai anhidrit, kadang-kadang berasosiasi dengan celestit dan magnesit. Endapan shabka benua terbentuk di bagian daratan dan terdiri atas campuran gosong pasir dan bahan karbonat hasil transportasi angin pantai. Batuan dasar yang keras menjadi landasan endapan sedimen ini, menyebabkan muka air tanah berada dekat permukaan untuk membawa ke arah terjadinya evaporasi. Pengendapan di wilayah ini dapat menghasilkan sekuen evaporit seperti yang terjadi pada evaporasi air laut di suatu cekungan tertutup. Penggantian secara luas di antara mineral-mineral evaporit dimungkinkan terjadi di lingkungan shabka ini (Friedman and Sanders, 1978).

Playa adalah daerah depresi dangkal dan luas di wilayah gurun, yang kadang-kadang digenangi sedikit air. Daerah ini sedikit dialiri sungai, terbentuk pada permukaan topografi terendah. Sedimen-sedimen playa diendap-

kan oleh air banjir yang tidak sering terjadi. Karena berada pada daerah perselingan peristiwa banjir dan kekeringan, endapan-endapan playa umumnya bersifat daur (*cyclic*) dan dapat terdiri atas perselingan lapisan pasir, lanau, lempung, dan mineral-mineral evaporit (kalsit, anhidrit, dolomit, gipsum atau halit). Endapan evaporit berbentuk laminasi halus dan terdiri atas mineral-mineral berbeda, didominasi oleh gipsum dan halit dengan setempat mengandung kalsit, aragonit, dan dolomit. Beberapa lapisan berwarna kehitaman karena keberadaan sulfida besi dan berasosiasi dengan lensa-lensa sulfur (Friedman and Sanders, 1978).

Di wilayah-wilayah non-marin beriklim tropis dapat juga terbentuk danau-danau besar berair dalam, yang airnya dapat secara permanen terstratifikasi. Lapisan air permukaan yang hangat tidak pernah mendingin untuk dapat menggantikan air termoklin dibawahnya, sehingga lapisan-lapisan air bagian bawah menjadi stagnan. Di sisi lainnya, karakteristik air danau sangat erat hubungannya dengan sedimen-sedimen yang diendapkan di dasar danau dan dikendalikan oleh iklim. Terutama faktor-faktor sirkulasi, salinitas, dan suhu air danau mempengaruhi terjadinya jenis-jenis endapan sedimen danau. Pada kedalaman < 50 m, air danau dengan kandungan sejumlah kecil oksigen terlarut akan digantikan oleh H_2S ; dan dengan tingginya salinitas air dapat diendapkan mineral-mineral evaporit seperti aragonit, halit, atau gipsum (Friedman and Sanders, 1978).

Ditemukannya formasi-formasi non-marin purba berwarna merah (*red beds*) di daerah-daerah ekuator diduga merupakan indikasi

keterkaitannya dengan iklim hangat. Pembentukan pigmen merah pada kebanyakan formasi sedimen non-marin purba masih diperdebatkan hingga kini, terutama terkait dengan pertanyaan bagaimana warna merah terbentuk dan aspek kelembaban iklim purba yang kering atau basah. Pigmen merah merupakan indikator keberadaan hematit (Fe_2O_3), yang terbentuk sebagai kristal-kristal halus heksagonal berdiameter antara 20 – 0,03 μ . Pada beberapa formasi sedimen berukuran halus hanya terdapat besi (Fe) sebagai pigmen. Pigmen terbentuk berupa matriks di antara partikel-partikel kuarsa dalam batulanau atau sebagai selubung partikel-partikel kuarsa. Selubung hematit tidak terbentuk pada tempat terdapatnya partikel-partikel kuarsa yang saling menekan satu dengan lainnya. Pigmen tersebut termasuk mineral maghemit (oksida ferik magnetis) meskipun sebagai aksesor.

TINJAUAN TERHADAP FORMASI BATUAN SEDIMEN DI INDONESIA

Tinjauan dilakukan dalam upaya mengidentifikasi indikator-indikator pendukung keterkaitan proses pembentukan formasi-formasi sedimen dengan kondisi iklim di masa lalu. Meskipun tidak seluruh kriteria formasi di atas dapat terpenuhi, setidaknya dari bahan-bahan tinjauan diperoleh informasi yang mengarahkan kepada penemuan bukti-bukti keterkaitan pengaruh iklim terhadap proses sedimentasi. Pada bagian ini penulis mencoba melakukan tinjauan terhadap formasi-formasi batuan sedimen tertentu dari wilayah Indonesia, di antaranya:

1. Endapan Teras Bengawan Solo

Teras adalah rupa bumi dengan permukaan berkemiringan landai, kadang-kadang panjang dan sempit dengan salah satu sisinya dibatasi oleh lereng terjal naik dan sisi lainnya oleh lereng terjal menurun (Zuindam, 1985); atau rupa bumi serupa tangga yang membatasi suatu dataran banjir sungai dan mengandung endapan aluvial (Bates dan Jackson, 1980). Teras merupakan unsur penting dalam bentang alam, karena dapat mencerminkan penurunan dasar permukaan tempat diendapkannya sedimen yang terkait perubahan iklim dan tektonik (Reading, 1986).

Sebaran endapan teras yang terkenal di Pulau Jawa merupakan contoh lain sedimen sungai purba yang ditemukan di sepanjang Bengawan Solo. Distribusinya dipercaya mengikuti aliran sungai purba yang melintasi dua wilayah Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur, membentuk pola aliran meander pada wilayah perbukitan Kendeng (Gambar 3). Meskipun tidak ditemukan bahan galian emas atau intan di dalamnya, endapan teras tersebut dikenal mengandung fosil-fosil yang berguna untuk penelitian palaeontologi dan arkeologi. Zuindam (1985) telah mengenali beberapa unsur di dalam sistem meander Bengawan Solo yang meliputi dataran banjir (*flood plain*), tanggul (*levee*), rawa-rawa di belakang tanggul (*back swamp*), gosong (*point bar*) yang telah menjadi teras, danau *oxbow*, dan *crevasses splay*.

Sartono (1976) membedakan enam fasa formasi teras di sepanjang Bengawan Solo, yaitu: (1) Rambut, berumur Plistosen Awal; (2) Kedungdowo, berumur Plistosen Awal; (3)

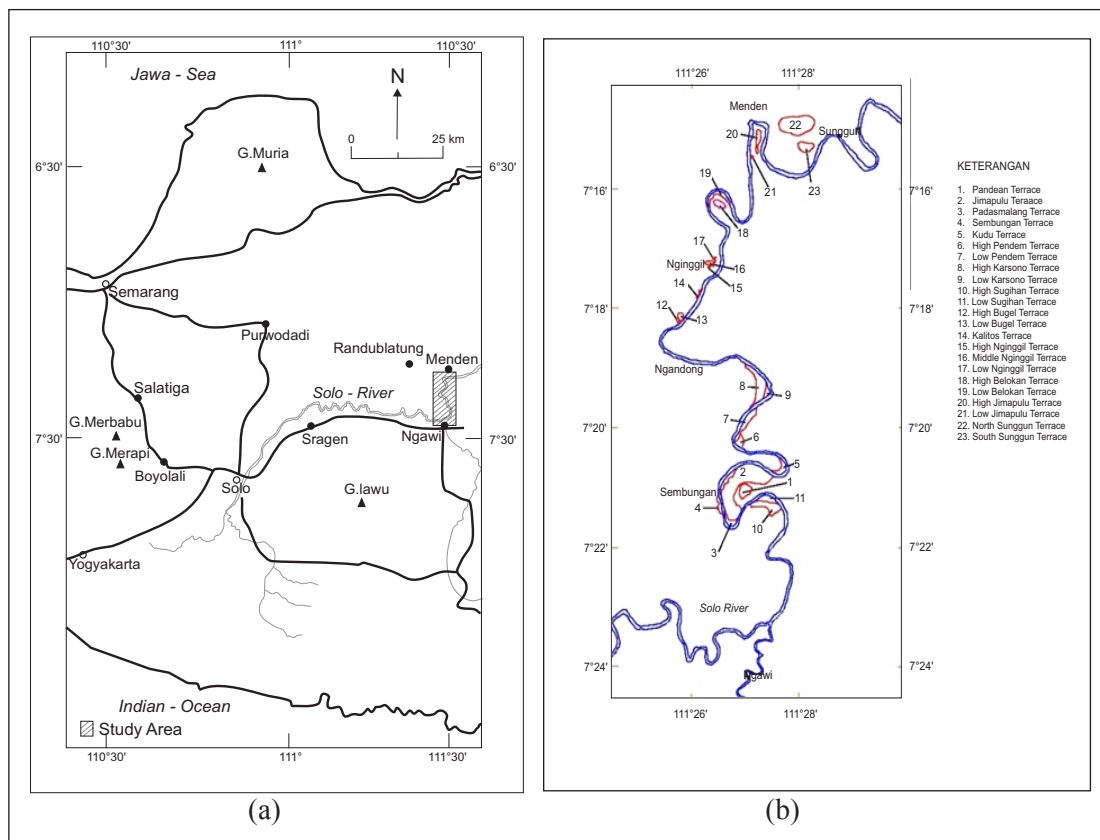
Getas, berumur Plistosen Tengah; (4) Ngandong, berumur Plistosen Atas; (5) Jipangulu, berumur Holosen Awal; dan (6) Menden, berumur Sub-Resen. Sementara Sidarto dan Morrwood (2004) melalui interpretasi citra satelit (DEM dan Landsat) mengidentifikasi 23 lokasi keberadaan endapan-endapan teras di sepanjang Bengawan Solo, wilayah pegunungan Kendeng.

Sartono (1976) serta Sidarto dan Morrwood (2004) mengidentifikasi bahwa formasi-formasi teras Bengawan Solo merupakan endapan-endapan point bar dari suatu sistem

sungai meander, dengan masing-masing umur yang berbeda berkisar dari Plistosen Awal hingga Sub-Resen. Teras pada umumnya terdiri atas perlapisan pasir hingga pasir tufa an bersusunan andesitis dan kerakal-kerikil atau konglomerat, yang sebagian di antaranya mengandung fosil-fosil hominid dan vertebrata.

2. Endapan *Red Beds* di Cekungan Sumatra Tengah

Cekungan Sumatra Tengah dibatasi sebelah baratdaya oleh geantiklin Bukit Barisan



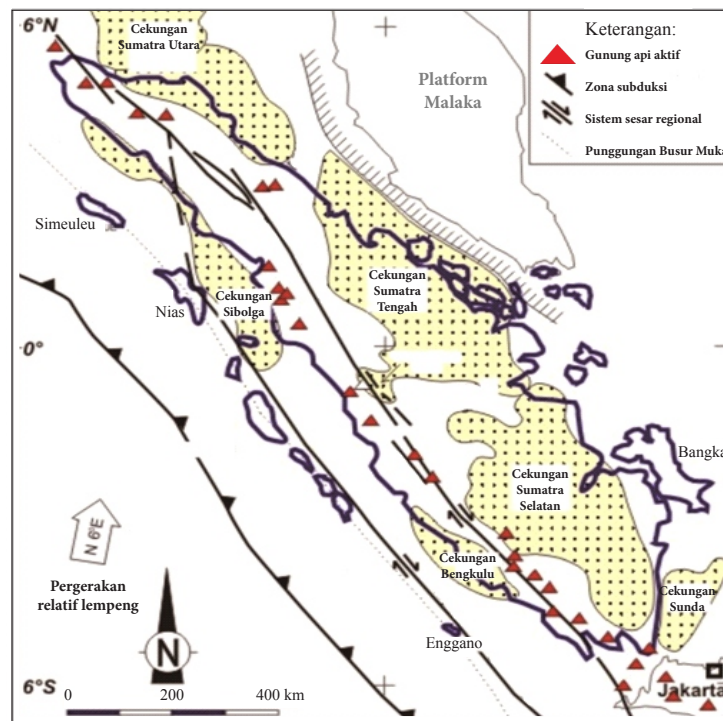
Gambar 3. a. Peta Indeks Wilayah Pegunungan Kendeng, b. Sebaran endapan teras Bengawan Solo di sekitar Pegunungan Kendeng (Sidarto dan Morrwood, 2004).

dan busur vulkanik, sebelah utara oleh busur Asahan, sebelah tenggara oleh Tinggian Tigapuluh, dan sebelah timur oleh kraton Sunda. Cekungan ini merupakan salah satu dari cekungan-cekungan busur belakang (*back-arc basins*) yang terbentuk di sepanjang bagian timur Sumatra dan Jawa (Gambar 4). Sedimen-sedimen diendapkan pada sistem terban berorientasi utara-selatan selama perkembangan fasa ekstensional, walaupun tidak ditemukan umur pasti dari endapan tersebut diduga bahwa pengendapannya dimulai pada Eosen (Dally *et al.*, 1987).

Dally *et al.* (1987) telah melakukan penyelidikan bahwa Cekungan Sumatra Tengah merupakan bagian dari rangkaian blok terban dari rejim ekstensional yang beriklim ke-

ring. Karakteristik stratigrafi sedimen berupa endapan fluvial/lakustrin termasuk ke dalam Formasi Pematang yang terdiri atas *Red Bed* Bawah, Serpih coklat dan *Red Bed* Atas. Anggota pertama terutama disusun oleh batupasir, batulanau, batulempung, dan konglomerat kipas aluvial yang berkembang di sepanjang terban. Yang kedua merupakan endapan lakustrin terdiri atas serpih kaya kandungan organik hingga batupasir berbutir halus. Sedangkan formasi ketiga terdiri atas batupasir berbutir kasar-halus, perselingan batulanau dan batulempung bervariasi warna merah.

Pada Oligosen Atas, tingkat amblasan berlangsung semakin perlahan sehingga menyebabkan menghilangnya tepian terban dan mengeringnya danau-danau tempat



Gambar 4. Tataan tektonik regional Sumatra (Modifikasi dari Dally *et al.*, 1987).

pengendapan sedimen-sedimen lakustrin. Sistem ekstensional terhenti pada akhir Oligosen dan diikuti oleh transgresi regional pada Miosen Awal, mengendapkan batupasir dan serpih berlapis tebal untuk mengisi terban-terban serta menutupi platform dasar.

DISKUSI

Besarnya banjir sungai di daerah beriklim tropis berkaitan dengan curah hujan. Ketika hujan turun sebagian airnya meresap ke dalam tanah (infiltrasi), di bawah tanah terjadi perkolasi melalui soil dan batuan, sedangkan yang tertinggal di permukaan mengalami penguapan untuk kembali ke atmosfer. Sisa dari ketiga jenis air di atas bergerak sebagai air permukaan, mengalir di bawah pengaruh gravitasi berupa sungai-sungai menuju danau-danau atau samudra. Banyak faktor yang menentukan terjadinya banjir, di antaranya yang terutama adalah kuantitas dan kecepatan pasokan air saat memasuki sistem aliran sungai. Ketika pemasukan air melebihi kapasitas sungai maka aliran air melampaui bantaran sungai (Montgomery, 2006).

Sungai-sungai tidak selalu mengalir mengikuti garis lurus dalam jangka panjang. Meskipun terjadi sedikit ketidakaturan aliran air pada saluran sungai akan menyebabkan fluktuasi kecepatannya secara setempat, menghasilkan erosi kecil di daerah-daerah berlawanan yang berarus air kuat dan mengendapkan sedimen di daerah-daerah dengan arus air melemah. Maka terbentuklah sungai-sungai berkelok atau meander dengan unsur-unsur dapat terdiri atas dataran banjir (*flood plain*), tanggul (*levee*), rawa-rawa di belakang tanggul (*back*

swamp), gosong (*point bar*), danau *oxbow*, *crevasses splay*. Tingkatan pergerakan lateral meander dapat mencapai puluhan atau ratusan meter/tahun, tetapi juga dapat berkisar < 10 m/tahun pada sungai-sungai kecil. Kendala-kendala atau ketidakaturan yang terjadi di dalam saluran sungai dapat memperlambat aliran air dan menyebabkan pengendapan sedimen secara setempat.

Pada kasus Bengawan Solo, endapan-endapan teras yang berasal dari gosong (*point bar*) adalah salah satu rekaman geologi penting yang kemungkinan dapat digunakan sebagai indikator keterkaitan pembentukannya dengan iklim setempat pada masa lampau. Banjir di sepanjang Bengawan Solo diyakini karena besarnya pemasukan (*influx*) air yang disebabkan peningkatan curah hujan. Selama banjir, permukaan air pada saluran sungai mengalami kenaikan; kemudian pada kondisi ekstrim sedimen yang berada di dasar saluran bergerak dan sebagian daripadanya diangkut oleh air banjir yang bersifat suspensi turbulen sehingga mengakibatkan pendalaman dasar saluran sungai.

Sedimen yang dibawa banjir diendapkan berupa gosong (*point bars*) yang saat ini dikenal sebagai teras Bengawan Solo, merupakan salah satu di antara jenis-jenis sedimen lainnya hasil pengendapan kegiatan tersebut di atas. Meskipun tidak secara lengkap menunjukkan rangkaian endapan gosong, ciri dominan mengarah kepada susunan bagian bawah endapan dimaksud yaitu berkisar dari kerikil-kerakal hingga konglomerat berlapis buruk; dengan sebagian daripadanya ditutupi oleh sedikit pasir tufaan terlitifikasi (Tabel 1). Se-

hubungan sedimen gosong yang bersusunan komponen-komponen vulkanik andesitik, menunjukkan bahwa proses sedimentasi berlangsung di lingkungan geologi yang dominan ditempati oleh batuan vulkanik andesitik (Gambar 5).

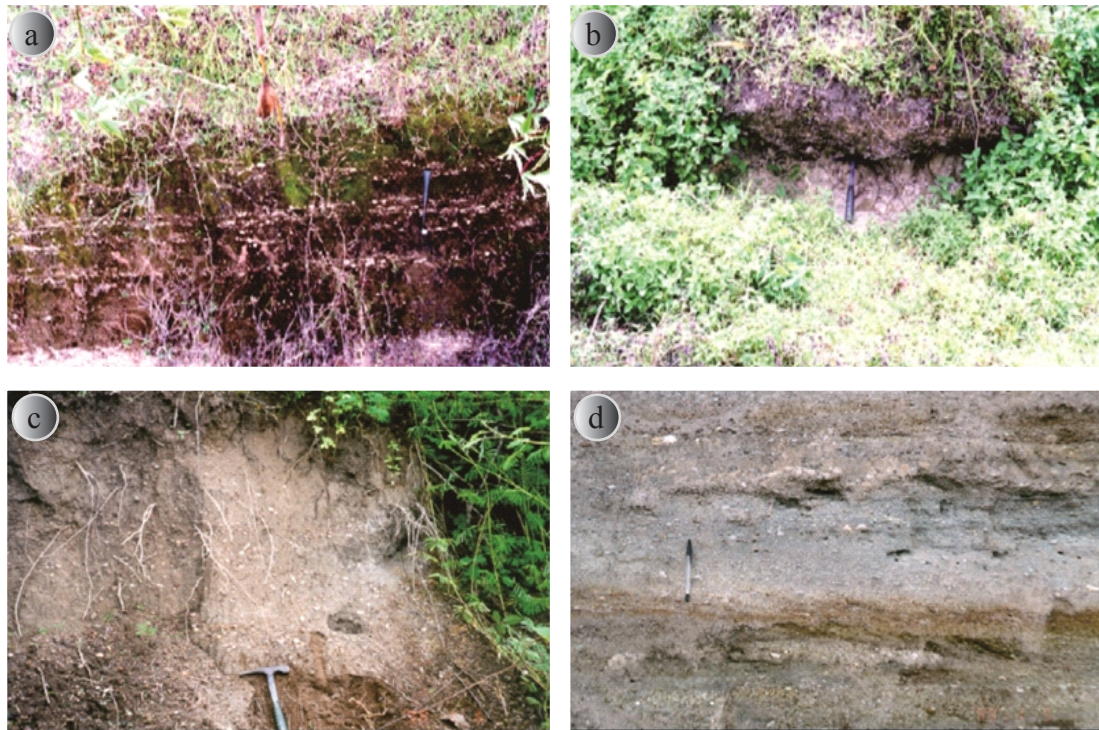
Mengacu kepada penemuan endapan-endapan gosong purba di sepanjang Bengawan Solo dengan kisaran dari Plistosen Awal hingga Sub-Resen, membawa ke arah dugaan bahwa telah terbentuk suatu formasi batuan sedimen penyusun stratigrafi regional Jawa Tengah-Timur melalui proses sedimentasi yang berlangsung ketika air sungai sedang dalam kondisi banjir. Peningkatan curah hujan pada periode antara Plistosen Awal hingga Sub-Resen diduga menjadi penyebab berlimpahnya pemasukan air pada saluran sungai yang pada gilirannya menciptakan banjir di sepanjang Bengawan Solo.

Terkait dengan pembentukan endapan sedimen *Red Beds* dari Cekungan Sumatra Tengah dan apabila penamaan tersebut mempunyai hubungan erat dengan warna pigmen merah yang berasal dari hematit, maka diskusi di bawah ini dapat dijadikan bahan dasar pemahaman keterjadiannya.

Kandungan Fe di dalam sedimen bervariasi tergantung jenis batuanannya. Mineral-mineral Fe di dalam batuan sedimen berasal dari kelompok oksida, karbonat, silikat lempung dan sulfida. Sementara sedimen dipastikan mengandung oksida-oksida rombakan dan bentukan baru. Di antara oksida-oksida termasuk titanomagnetit dan ilmenit yang bertahan terhadap pelapukan karena tingginya stabilitas terhadap lingkungan permukaan. Konsentrasi yang tinggi dari kedua mineral tersebut dapat terbentuk di dalam sedimen-sedimen pasiran.

Tabel 1. Beberapa endapan teras yang ditemukan di Bengawan Solo (Sidarto dan Morrwood, 2004)

Nama	Elevasi dari dasar sungai	Susunan endapan teras	Umur
Padasmalang	3 – 4 m	Kerikil-kerakal dan pasir tufaan	Sub-Resen
Kudu	2 m	Pasir andesitik	
Pendem Bawah	2 – 3 m	Sedikit konglomerat dan pasir tufaan andesitik, mengandung fosil vertebrata	
Karsono Bawah	2 – 3 m	Konglomerat andesitik	
Sugian Bawah	2 – 3 m	Pasir dengan sedikit kerikil-kerakal, bersifat andesitik	
Jimapulu	16 m	Konglomerat andesitik mengandung fosil vertebrata dan pasir tufaan	Holosen Awal
Sugian Atas	13 m	Pasir tufaan dan kerikil-kerakal andesitik, mengandung fosil vertebrata	
Pandean	>16 m	Fragmen andesit dan pasir	Plistosen Akhir atau lebih muda
Pendem Atas	16 – 17 m	Konglomerat andesitik mengandung fosil vertebrata, pasir tufaan	
Karsono Atas	16 – 17m	Konglomerat pasiran andesitik	
Sembungan	20 m	Sedikit konglomerat dan pasir andesitik, mengandung fosil vertebrata	Plistosen Akhir atau lebih tua



Gambar 5. a. Bagian dari endapan teras Ngandong atas terdiri atas pasir tufaan (Sidarto dan Morrwood, 2004), b. Bagian dari endapan teras Ngandong Bawah terdiri atas konglomerat andesitik (Sidarto dan Morrwood, 2004), c. Bagian dari endapan teras Karsono Atas terdiri atas konglomerat dan pasir tufaan andesitik (Sidarto dan Morrwood, 2004), dan d. Bagian dari endapan teras Sembungan terdiri atas konglomerat dan pasir tufaan andesitik (Sidarto dan Morrwood, 2004).

Endapan *red beds* dapat berasal dari benua atau marin, mempunyai warna bervariasi dari coklat kemerahan hingga merah, tetapi dapat juga berwarna merah hingga ungu. Pada kenyataannya, hematit sering teridentifikasi di dalam endapan *red beds*. Secara mikroskopis dibedakan berdasarkan ukuran partikel: dari ultra-halus pigmen merah (kristal-kristal tunggal tidak kasat mata) hingga berukuran kasar (2 – 40 μm) berupa hematit spekular. Secara genetika terdapat 2 jenis hematit, yaitu: (1) hematit rombakan yang terbentuk sebagai selubung dan impregnasi fragmen-fragmen batuan, berasal dari soil merah yang tererosi

karena proses pelapukan; (2) hematit berupa kristal autigenik dan idiomorfik berukuran beberapa μm sebagai agregat-agregat. Diduga bahwa jenis hematit kedua ini merupakan pseudomorf dari goetit, biotit, atau pirit. Hematit autigenik beraneka bentuk kristal dapat berasal dari magnetit, biotit dan ilmenit yang teroksidasi; sementara transformasi pseudomorf goetit menjadi hematit terjadi pada saat kenaikan suhu dari 47°C ke >105°C sejalan dengan penambahan kedalaman penimbunan (550 m ke 2500 m). Kristal-kristal hematit idiomorfik terkonsentrasi di dalam pori-pori batuan dan menyebabkan tersemennya butir-

an mineral berukuran kasar. Diduga bahwa peningkatan ukuran butir hematit dapat mengubah warnanya dan karena itu sedimen menjadi berubah warna dari merah menjadi ungu (Cornell, 2003).

Pendekatan di atas akan menjadi lebih lengkap dengan penjelasan mekanisme (Friedman and Sanders, 1978) sebagai berikut:

1. Hematit dapat terbentuk di dalam soil lateritik pada iklim tropis-lembab karena oksidasi besi ferro yang berasal dari mineral-mineral silikat pembentuk batuan ferromagnesian (piroksen, hornblenda, biotit, dan klorit) dan magnetit. Kemudian hematit ditransportasi ke tempat pengendapan dan tidak mengalami banyak perubahan.
2. Hematit terbentuk oleh perubahan in-situ dari oksida besi terhidrasi, berasal dari hasil oksidasi mineral-mineral mengandung besi (silikat-silikat ferromagnesian dan magnetit) pada iklim tropis panas-kering. Mineral-mineral asal yang mengandung besi ferro diendapkan sebagai aluvium tidak berwarna merah, berubah in-situ menjadi oksida besi terhidrasi berwarna kecoklatan, dan sejalan waktu berubah menjadi hematit.
3. Hematit terbentuk dalam waktu lama dari oksida ferrik terhidrasi berwarna kekuningan dan kecoklatan pada iklim tropis-basah; oksida-oksida ini diendapkan sebagai aluvium: (a) berupa soil hasil pelapukan yang ditransportasi dan diendapkan oleh air sungai, atau (b) berupa hasil ubahan in-situ dari mineral-mineral ferromagnesian.
4. Hematit berasal dari satuan lapisan berwarna merah terdahulu, yang kemudian diendapkan kembali sebagai partikel-partikel daur ulang kedua.
5. Hematit diendapkan langsung di luar daerah laut selama tahap-tahap evaporasi.

Kelima mekanisme di atas dapat menghasilkan hematit yang membuat suatu lapisan batuan menjadi berwarna merah. Namun yang berkaitan dengan iklim adalah butir 1, 2, dan 3, yaitu masing-masing berimplikasi iklim tropis-basah untuk butir 1 dan 3, serta iklim tropis kering untuk butir 2.

Sehubungan penemuan sedimen *Red Beds* di Cekungan Sumatra Tengah (Formasi Pematang) yang diendapkan pada periode Eosen – Oligosen sebagai sedimen cekungan-cekungan busur belakang (*back-arc basins*), membawa ke arah dugaan bahwa proses pembentukan formasi sedimen pada periode waktu tersebut berimplikasi dipengaruhi oleh iklim tropis-kering. Dugaan ini diperkuat oleh pernyataan Dally *et al.* (1987) bahwa Cekungan Sumatra Tengah merupakan bagian dari rangkaian blok terban dari rejim ekstensional yang beriklim kering.

Mengeringnya danau-danau pada Oligosen Akhir diduga erat kaitannya dengan pengaruh iklim tersebut. Kondisi iklim diduga menyebabkan mineral-mineral Fe-oksida (silikat ferromagnesian dan magnetit) sebagai komponen-komponen sedimen lakustrin mengalami hidrasi, yaitu terserapnya molekul-molekul air oleh mineral-mineral dimaksud; yang pada gilirannya mengalami ubahan in-situ untuk membentuk mineral-mineral baru mengandung air kristal (di antaranya hematit).

Keberadaan hematit ditunjukkan oleh variasi pigmen dimulai dari berwarna kekuningan dan kecoklatan, kemudian berubah menjadi merah. Perubahan dari warna kekuningan/kecoklatan menjadi merah dapat terjadi dalam waktu berkisar ribuan hingga beberapa juta tahun.

KESIMPULAN

1. Penemuan endapan-endapan gosong purba (teras) Bengawan Solo, membawa ke arah dugaan bahwa sedimen tersebut diendapkan ketika wilayah Pegunungan Kendeng mengalami iklim tropis-basah dan air sungai sedang dalam kondisi banjir karena peningkatan curah hujan.
2. Keberadaan endapan *red beds* di cekungan Sumatra Tengah mengekspresikan bahwa formasi sedimen tersebut mengandung pigmen coklat-merah (hematit), yang terbentuk ketika bagian tengah Pulau Sumatra mengalami iklim tropis-kering.
3. Tinjauan keterkaitan proses sedimentasi dengan pengaruh iklim tropis basah dan kering di atas diharapkan dapat menjadi bahan inspirasi para ahli geologi untuk melakukan penelaahan hubungan perubahan iklim dengan aspek geologi lainnya.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Sdr. Sofyan Suwardi (Ivan), ST, atas upayanya dalam memodifikasi gambar-gambar untuk kelengkapan karya tulis ini.

ACUAN

Bates, R.L. and Jackson, J.A., 1980, Glossary of Geology, Second Edition, American Geological Institute, Falls Church, Virginia, 750 pages.

Cornell, R.M., 2003, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. U. Schwertmann Copyright © WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KgaA, Weinheim. ISBN: 3-527-30274-3.

Dally, M.C., Hooper, B.G.D., and Smith, D.G., 1987, Tertiary Plate Tectonics and Basin Evolution in Indonesia, in proceedings Indonesian Petroleum Association, Sixteenth Annual Convention, Jakarta, pp. 399-428.

Friedman, G.M. and Sanders, J.E., 1978, Principles of Sedimentology, Jhon Wiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore, 576 pages.

Houghton, J. T., 2001, Climate change: the scientific basis: contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN 0-521-80767-0.

Kemp, A.E.S., 1996, Palaeoclimatology and palaeoceanography from laminated sediments, Geological Society Special Publication No. 116.

Lemke, Ritter, and Heywood, 2009, Physical Geography Laboratory Manual, McGraw-Hill.

Montgomery, C.W., 2006, Environmental Geology, Seventh Edition, McGraw Hill International Edition, 540 pages.

Reading, H.G., 1986, Sedimentary Environments and Facies. Blackwell Scientific Publication, Melbourne.

- Sartono, S., 1976, Genesis of the Solo terraces. Mod. Quad. Res. in SE Asia, 2, 1-21.
- Sidarto and Morrwood, M.J., 2004, Solo River Terrace Mapping in the Kendeng Hills area, Java: Use of Landsat Imagery and Digital Elevation Model Overlays, Journal of Geological Resources, Geological Research and Development Centre, Bandung, 196-207.
- Zuindam, R.A. van, 1985, Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publication – The Hague, The Netherlands.