

Pencirian dan tafsiran Paleo-sekitaran stromatolit dan thrombolit dalam jujukan Batu Kapur Setul di Langkawi dan Perlis (Characterisation and interpretation of stromatolites and thrombolites Paleo-environment in Setul Limestone succession, Langkawi and Perlis)

MOHAMAD EZANIE ABU SAMAH*, CHE AZIZ ALI, KAMAL ROSLAN MOHAMED
& NURUL AFIFAH MOHD RADZIR

Program Geologi, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, 43600, Malaysia

*Corresponding author email address: mohamadezanie@yahoo.com

Abstrak: Endapan mikrobial jujukan Batu Kapur Setul diwakili oleh pembentukan lapisan stromatolit, thrombolit dan onkolit. Setiap struktur mikro-organisma ini menunjukkan sifat fizikal yang berubah daripada geometri berbentuk lurus, beralun, turus, selari serta jaringan kompleks. Hasil cerapan log sedimen pada jujukan batu kapur (Ahli Setul Bawah dan Ahli Setul Atas) di kawasan Pulau Langgun dan Perlis telah mengenalpasti beberapa pengelasan fasies mikrobial antaranya seperti fasies thrombolit berstruktur jaringan kompleks (Ftk), fasies stromatolit berstruktur selari (Fss), fasies stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa), fasies onkolit (Fso), fasies stromatolit berstruktur turus (Fst), fasies stromatolit berstruktur alunan (Fsa) dan fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl). Penguasaan thrombolit dan stromatolit selari di kawasan Pulau Langgun membuktikan pertumbuhan ini dikawal sepenuhnya oleh arus gelora kuat yang menyebabkan proses kerukan betindak secara aktif pada topografi struktur mikrobial tersebut. Pembentukan onkolit dan stromatolit bersifat turus, beralun dan lurus pula menguasai pertumbuhan di kawasan Perlis. Fasies yang berubah secara beransur-ansur ini menunjukkan pertumbuhannya dikawal oleh faktor kedalaman persekitaran, di mana kemasukan bahan sedimen mikrobial untuk berinteraksi dengan mikro-organisma adalah bergantung kepada keluasan ruang pertumbuhan yang tersedia. Di dalam konteks tafsiran paleo-sekitaran, setiap pembentukan fasies memberi gambaran bahawa ianya terendap pada persekitaran karbonat berlaut cetek iaitu melibatkan zon sub-pasang surut hingga supra-pasang surut. Taburan fasies yang berubah secara beransur menandakan jujukan perlapisan batu kapur adalah bercirikan semakin mencetek ke atas dengan faktor kawalan yang dipengaruhi oleh kedalaman persekitaran, proses hidrodinamik, biologi dan kimia.

Kata kunci: Stromatolit, thrombolit, onkolit, fasies mikrobial, paleo-sekitaran karbonat laut cetek

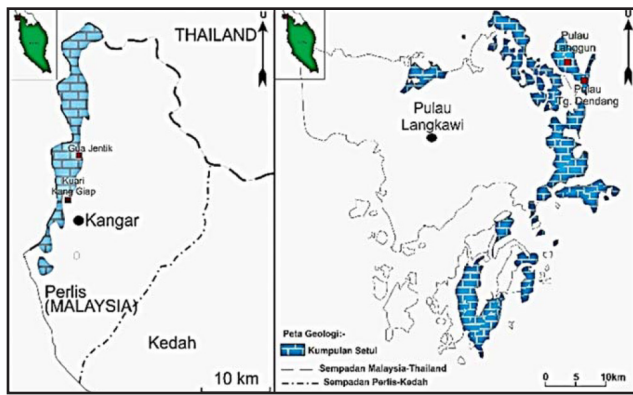
Abstract: Microbial deposits in Setul Limestone succession are represented by stromatolites, thrombolites and oncolites layers. Each microorganism exhibits physical geometries that change either from straight, wavy, parallel or network-like complex structure. The results of sedimentary logging on the limestone sequences (Lower Setul Member and Upper Setul Member) in Langgun Island and Perlis area have identified a several microbial facies such as network-like complex thrombolitic facies, parallel stromatolitic facies, compound stromatolitic facies, oncolites facies, columnar stromatolitic facies, wavy stromatolitic facies and straight stromatolitic facies. Thrombolites and parallel stromatolites, dominating in Langgun Island area prove that the growth of microbial is controlled by the strong current flow which causes active scour process in the topography of the microbial structure. On the other hand, the formation of oncolites and columnar, wavy and straight stromatolites are dominant in Perlis area. The gradual changes of microbial facies indicate that the growth of structures is controlled by the environmental depth, in which the influx of organosedimentary materials that interact with micro-organisms relies on the availability of accommodation space. In the context of the paleo-environment interpretation, it is shown that the microbial facies are deposited in shallow marine carbonate environments from subtidal to supratidal zone. The gradual changes of microbial facies distribution indicate that the limestone succession is characterised by the shallow upward sequences that is influenced by the depth of the environment, the hydrodynamic, biological and chemical processes.

Keywords: Stromatolites, thrombolites, onkolites, microbial facies, shallow marine carbonate

PENGENALAN

Kumpulan mikrobial yang terdiri daripada stromatolit dan thrombolit merupakan dua struktur entiti utama yang terbentuk pada jujukan Batu Kapur Setul. Pengendapan mikrobial ini meliputi hampir keseluruhan perlapisan batu kapur pada jujukan Formasi Kaki Bukit (Ahli Setul Bawah) dan Formasi Mempelam (Ahli Setul Atas) di

kawasan Pulau Langgun dan Perlis (Rajah 1). Kedua-dua struktur tersebut mempunyai pencirian sifat fizikal yang berbeza, tetapi ditafsirkan mempunyai konsep asas pembentukan yang sama iaitu terhasil daripada interaksi hidupan mikro-organisma dengan sedimen melalui proses pemerangkapan/pengikatan atau pemendakan mineral (Burne & Moore, 1987).



Rajah 1: Taburan batuan bagi jujukan Batu Kapur Setul yang tersebar di sekitar kawasan Langkawi dan Perlis.

Kewujudan struktur ini amat penting di dalam tafsiran paleo-sekitaran kerana sifat fizikalnya yang sentiasa berevolusi mengikut persekitaran bagi tujuan pengekalan serta pemeliharaan daripada kepupusan. Kemuncak pertumbuhan hidupan stromatolit bermula semasa era Archean hingga Meso-Proterozoik. Komuniti ini dominan terbentuk di persekitaran pasang-surut karbonat, pelantar dan terumbu (Grotzinger, 1989; Grotzinger & Knoll, 1999; Semikhatov & Raaben, 2000). Hidupan ini kemudiannya berevolusi kepada onkolit, stromatolit dan thrombolit di zaman Paleozoik Awal yang terbentuk secara meluas di kawasan karbonat berlaut cetek (Pratt & James, 1982). Walau bagaimanapun, kadar pertumbuhan stromatolit dan thrombolit mula menurun memasuki zaman akhir Pra-Kambrian hingga Ordovisi Awal akibat daripada peningkatan persaingan dengan hidupan metazoan (Garrett, 1970; Mazzullo & Friedman, 1977; Walter & Heys, 1985; Riding, 2006). Kadar penurunan ini berlaku secara berterusan hingga ke zaman Silur Awal akibat daripada perubahan persekitaran serta kepupusan hidupan secara besar-besaran (Playford *et al.*, 1976 dan Dongjie *et al.*, 2013).

Perubahan yang berlaku di antara zaman Ordovisi hingga Silur ditandakan sebagai garis masa yang penting bagi melihat hubungkait serta pola taburan hidupan stromatolit dan thrombolit pada jujukan Batu Kapur Setul. Di dalam laporan ini, kajian ke atas peninggalan struktur stromatolit dan thrombolit akan tertumpu kepada tiga objektif utama iaitu (i) pembahagian fasies mikrobial pada jujukan Ahli Setul Bawah dan Ahli Setul Atas; (ii) tafsiran paleo-sekitaran bagi setiap jenis pembentukan stromatolit dan thrombolit; dan (iii) membina model paleo-sekitaran bagi jujukan batu kapur yang terbentuk di kawasan Perlis dan Pulau Langgun.

GEOLOGI AM

Batu Kapur Setul tersebar secara meluas di kawasan Pulau Langkawi dan daratan Negeri Perlis. Jones (1981) telah membahagikan Formasi Setul kepada beberapa unit utama yang dikenali sebagai sebagai Ahli Setul Bawah, Ahli Gersik Bawah, Ahli Setul Atas dan Ahli Gersik Atas. Unit batu kapur yang diwakili jujukan Ahli Setul Bawah and Ahli Setul Atas dicirikan sebagai berlapisan batu kapur yang terhablur, berwarna kelabu gelap dan berlapisan

tebal. Manakala, unit gersik adalah terdiri daripada batuan kuarzit, syal berkarbon, sabak dan batu lumpur berijang (Jones, 1981).

Setelah hampir 40 tahun penamaan tersebut diguna pakai di dalam stratigrafi barat laut, Semenanjung Malaysia, Cocks *et al.* (2005) telah menyemak semula jujukan ini dan menaik taraf setiap unit ahli kepada formasi baharu yang dikenali sebagai Formasi Kaki Bukit, Formasi Tanjung Dendang, Formasi Mempelam dan Formasi Timah Tasoh. Manakala, kedudukan stratigrafi bagi jujukan Formasi Setul telah dinaik taraf sebagai Kumpulan Setul. Di dalam kertas ini, penggunaan skema pembahagian litostratigrafi yang diperkenalkan oleh Jones (1981) akan digunakan bagi tujuan perbincangan hasil kajian.

Usia batuan bagi jujukan ini telah dicatatkan bermula dari zaman Ordovisi hingga ke zaman Devon, di mana bahagian dasar jujukan ini telah menindih Formasi Machinchang secara selaras (Jones, 1968). Di bahagian atas pula, jujukan ini telah ditindih secara tidak selaras oleh Lapisan Merah Langgun di kawasan Pulau Langgun (Kobayashi & Hamada, 1973). Walau bagaimanapun, ianya dilihat berbeza di kawasan Perlis, apabila bahagian atas jujukan Batu Kapur Setul ini ditafsirkan sebagai jujukan peralihan (Formasi Jentik) di antara Ahli Setul Atas dan Formasi Kubang Pasu (Hassan & Lee, 2002). Kemudian, penamaan stratigrafi ini digugur dan dipecahkan kepada beberapa penamaan formasi baharu, antara salah satunya adalah Formasi Timah Tasoh yang terbahagi kepada dua ahli baru iaitu Ahli Lalang dan Ahli Bukit Rajah (Hassan & Lee, 2005). Kedua-dua ahli ini ditafsirkan sebagai sempadan perantaraan bagi jujukan Setul dan Formasi Kubang Pasu di kawasan Perlis. Tafsiran paleo-sekitaran menunjukkan keseluruhan jujukan ini adalah terbentuk di persekitaran laut cetek dan laut dalam yang dipercayai dikawal oleh perubahan paras air laut (Ali & Mohamed, 2013).

KAEDAH KAJIAN

Kajian mengenai pencirian dan tafsiran paleo-sekitaran fasies mikrobial telah dilakukan pada singkapan jujukan batu kapur di kawasan Pulau Langgun dan Perlis. Hasil pengumpulan data di lapangan adalah bertujuan untuk mengenalpasti aspek ciri-ciri fizikal batuan seperti pembahagian jenis batuan, warna, saiz butiran, ketebalan berlapisan dan struktur sedimen. Kesemua pencirian ini perlu ditanda atau dilakarkan di dalam helaian log sedimen sebagai perwakilan fasies mikrobial. Setiap jenis fasies ini kemudiannya diambil sampel batuan bagi tujuan analisis makmal. Sebanyak 93 sampel batuan yang telah dikutip di lapangan dipotong dan digilap bagi menghasilkan keratan nipis untuk tujuan analisis cerapan petrografi. Keratan nipis ini dicirap dengan menggunakan mikroskop petrografi jenis LEICA DM4500 P untuk penilaian tekstur dalaman sampel tersebut seperti, jenis fabrik, bentuk fabrik serta kandungan mikrobial yang terbentuk. Kaedah yang terakhir adalah pentafsiran data yang telah dianalisis bagi tujuan pembinaan model paleo-sekitaran kawasan kajian.

HASIL KAJIAN

Cerapan log sedimen

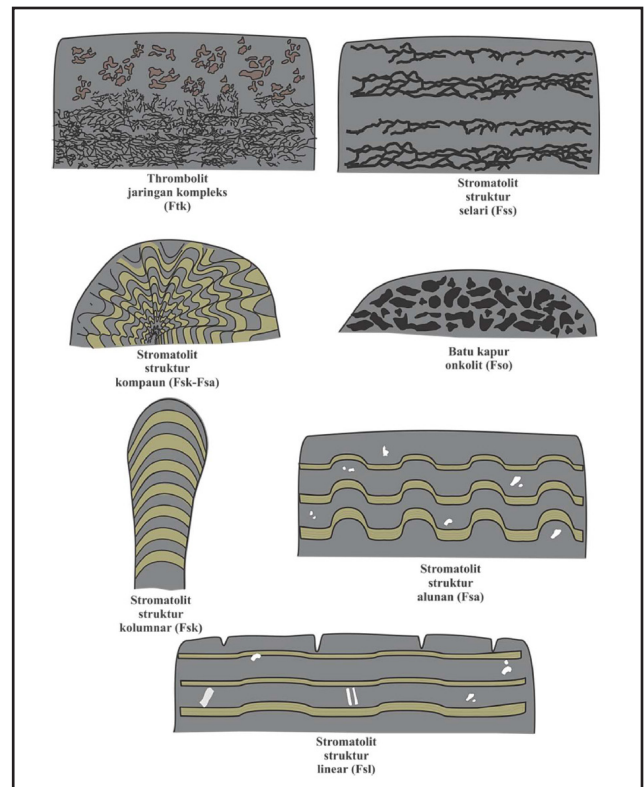
Log sedimen telah dirakam pada dua lokaliti utama di kawasan daratan Perlis dan Pulau Langgun. Jujukan batu kapur di kawasan daratan Perlis yang merupakan sebahagian daripada jujukan Ahli Setul Bawah adalah dicirikan dengan pengendapan sedimen karbonat bersaiz tebal dengan anggaran ketebalan jujukan adalah sekitar 155 meter. Jujukan ini turut dicirikan mengguna pendekatan mikrofasis yang terdiri daripada batu bebat hingga batu lumpur, berwarna kelabu gelap, kekurangan struktur sedimen serta dikuasai oleh pembentukan struktur stromatolit. Setiap lapisan stromatolit ini telah dibahagikan kepada lima jenis fasis mikrobial utama iaitu fasis onkolit (Fso), fasis stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa), fasis stromatolit berstruktur turus (Fst), fasis stromatolit berstruktur alunan (Fsa) dan fasis stromatolit berstruktur lurus (Fsl) (Rajah 2).

Di kawasan Langkawi, jujukan bagi Ahli Setul Bawah dan Ahli Setul Atas adalah tersingkap pada bahagian selatan hingga barat laut Pulau Langgun. Jujukan ini dicirikan oleh pengendapan sedimen karbonat yang terbahagi kepada beberapa pengelasan fasis mikrobial. Antaranya seperti fasis thrombolit jaringan kompleks (Ftk), fasis stromatolit berstruktur selari (Fss) dan fasis stromatolit berstruktur lurus (Fsl) (Rajah 2).

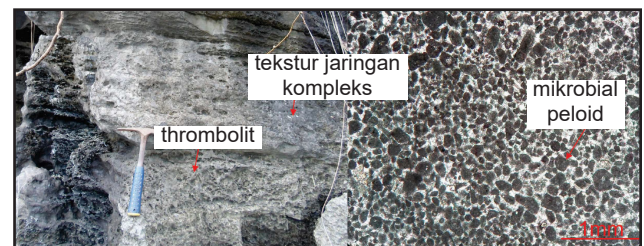
FASIES MIKROBIAL

Fasies thrombolit berstruktur jaringan kompleks (Ftk)

Huraian: Pembentukan struktur thrombolit dilihat mendominasi pada keseluruhan jujukan batu kapur di kawasan Pulau Langgun. Walau bagaimanapun, ianya amat sukar untuk dikenalpasti di lapangan kerana faktor luhawa yang telah memusnahkan struktur asal fasis tersebut. Sifat fizikal fasis ini menunjukkan pembentukan thrombolit yang sangat tebal, berwarna kelabu gelap serta membentuk tekstur permukaan yang tidak seragam. Kewujudan struktur ini seakan pembentukan struktur luhawa tafoni yang terhasil daripada aktiviti hakisan yang aktif. Penguasaan thrombolit pada bahagian bawah jujukan di Pulau Langgun dilihat semakin berkurangan dan berubah secara beransur-ansur menjadi kelompok kecil pada bahagian atas jujukan batuan tersebut. Pencirian utama bagi struktur thrombolit adalah pembentukan struktur individu yang terdiri daripada pelbagai bentuk, saiz dan tekstur (Rajah 3). Pengelasan bentuk mesogumpalan yang terdiri daripada poli-cuping, tautan dan tautan padat ditafsirkan mempunyai persamaan seperti bentuk maseria yang diperkenalkan oleh Shapiro & Awramik (2006). Kandungan fabrik bagi struktur ini dikuasai oleh butiran peloid berbentuk bulat serta berasosiasi dengan fabrik ketulan dan bersaiz halus yang dikelaskan sebagai butiran mikrobial peloid (Rajah 3). Setiap celahan butiran ini diisi oleh kalsit, simen spar atau mikrit. Pembentukan mikrit padat dan ketulan mikrit juga dapat dikesan berdasarkan kepada pembentukan butiran yang terbentuk secara padat serta bertompokan. Mineral dolomit turut terbentuk pada sebahagian struktur thrombolit yang yang menandakan



Rajah 2: Fasis mikrobial mengikut pengelasan makro- dan mesostruktur yang dijumpai pada jujukan Batu Kapur Setul.



Rajah 3: Pembentukan thrombolit berstruktur jaringan kompleks (Ftk). Tekstur dalaman fasis didominasi butiran mikrobial peloid, ketulan mikrit dan mikrit padat.

fasis ini mengalami proses pendolomitan hasil daripada proses diagenesis.

Tafsiran: Pembentukan struktur thrombolit yang terbentuk secara dominan pada jujukan batu kapur di kawasan Pulau Langgun memberi gambaran bahawa jujukan ini terbentuk pada persekitaran yang lebih dalam jika dibandingkan dengan jujukan batu kapur di Perlis. Bentuk morfologi yang bersifat jaringan kompleks serta kekurangan pembentukan oleh laminasi mikrobial adalah disebabkan kesan daripada masa, bentuk topografi dan jumlah taburan enapan sedimen pada hamparan alga yang tidak seragam. Pembentukan struktur reranting dan bercabang membuktikan bahawa struktur thrombolit ini terbentuk pada persekitaran yang dinamik. Persekitaran ini dikawal oleh arus gelora yang kuat serta bertindak daripada pelbagai arah hingga menyebabkan kesukaran di dalam pemerangkapan bahan sedimen. Sekaligus mengenyapkan bahan organik tersebut pada dasar topografi

hingga menghasilkan geometri bersifat kompleks (Bosak *et al.*, 2013). Kehadiran lapisan silang yang wujud bersama struktur thrombolit pada batuan bebat turut dipercayai terhasil daripada pengaruh arus tenaga ombak dan pasang surut yang dominan (Shapiro & Awramik, 2006). Perubahan dari sudut kepadatan mesogumpalan membuktikan persaingan di antara hidupan mikro-organisma untuk mengisi ruang pertumbuhan adalah lebih aktif di bahagian dasar. Manakala, pengisian thrombolit di bahagian atas semakin berkurangan disebabkan gangguan daripada hidupan inveterbrata yang memusnahkan struktur tersebut. Jumlah kepadatan mesogumpalan ini membuktikan persaingan di antara hidupan mikrobial memainkan peranan di dalam penghasilan mesogumpalan sama ada secara padat, terasing atau berkelompok (Kahle, 2001).

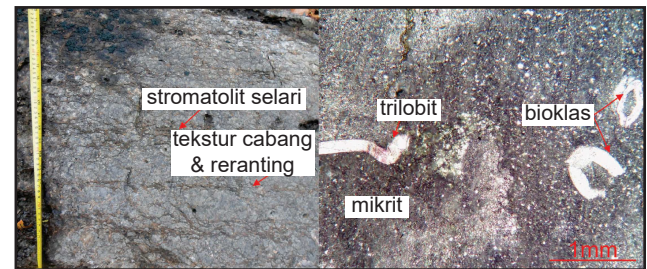
Fasies stromatolit berstruktur selari (Fss)

Huraian: Fasies ini membentuk sebagai sebuah struktur jaringan kompleks yang terendap secara selari dengan peralapisan batu kapur. Ianya dilihat membentuk pada bahagian tengah dan atas jujukan batu kapur di kawasan Pulau Langgun. Pembentukan struktur individu serta kandungan fabriknya disifatkan sebagai bercabang, reranting, serta mempunyai tekstur permukaan yang kasar dan tidak seragam (Rajah 4). Hasil gabungan struktur individu ini kemudiannya membentuk sebuah morfologi berskala mega yang bercirikan rangkaian jaringan kompleks seakan fasies thrombolit. Walau bagaimanapun, susunan geometri bagi fasies ini adalah lebih bersifat tersusun secara selari jika dibandingkan dengan struktur thrombolit yang terbentuk secara rawak dan masif. Pembentukan fasies ini dihuraikan terbentuk pada peralapisan batu kapur dari jenis batu lumpur dan batu wak kerana struktur ini diisi oleh butiran bersaiz halus seperti bahan lumpur karbonat (Rajah 4). Kehadiran butiran alokem adalah amat jarang ditemui melainkan serpihan kerangka yang telah musnah dan sukar untuk dikenalpasti.

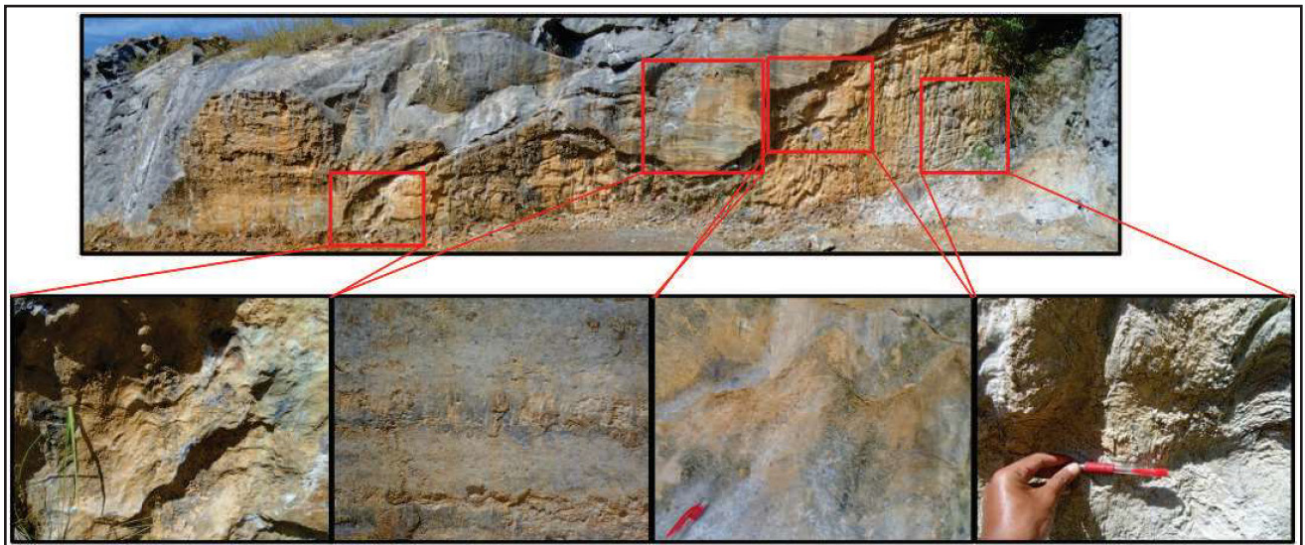
Tafsiran: Pembentukan fasies yang bersifat selari serta berjaringan kompleks dipercayai terbentuk hasil daripada pengaruh proses hidrodinamik yang bertindak ke atas struktur tersebut. Struktur ini terbentuk daripada proses yang sama berlaku pada fasies thrombolit, di mana arus gelora yang kuat menyukarkan aktiviti mikro-organisma untuk memerangkap bahan sedimen bagi membentuk stromatolit bergeometri lengkungan. Kegagalan memerangkap bahan sedimen ini menyebabkan sedimen tersebut terendap secara rawak pada bahagian dasar topografi stromatolit sehingga menghasilkan geometri berbentuk cabang atau reranting (Hofmann, 1969; Bosak *et al.*, 2013). Walau bagaimanapun, susunan tesktur jaringan kompleks yang terbentuk secara selari dalam peralapisan batu kapur membuktikan pengaruh arus gelora hanya bertindak pada suatu tempoh masa yang tertentu sahaja.

Fasies stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa)

Huraian: Fasies ini merupakan pembinaan sebuah jasad stromatolit berkoloni yang membentuk sebagai terumbu stromatolit (Rajah 5). Pengelasan stromatolit kompaun adalah merujuk kepada gabungan diantara stromatolit berbentuk turus (Fst) dan stromatolit beralun (Fsa) yang disifatkan mempunyai bentuk topografi lebih landai berbanding stromatolit berturus, tetapi mempunyai



Rajah 4: Pembentukan stromatolit berstruktur selari (Fss) bertekstur cabang dan reranting. Tekstur dalaman fasies didominasi butiran mikrit dan kreangka bioklas.



Rajah 5: Pembentukan stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa) yang mewakili persekitaran terumbu karbonat. Gambaran jelas menunjukkan pembentukan stromatolit bersifat alunan, berangkaian dan mempunyai sudut darjah lengkungan yang lebih rapat.

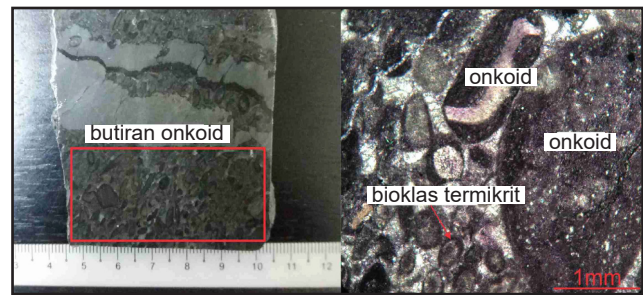
sudut lengkungan yang lebih rapat berbanding daripada stromatolit beralun (Pratt & James, 1982). Pembentukan fasies ini dilihat terbentuk daripada beberapa siri episod pengendapan sedimen mikrobial yang mampu mencecah sehingga 6 meter ketebalan. Tekstur dalaman bagi struktur ini adalah terbentuk daripada endapan mikrobial bersaiz lodak atau pasir halus yang disifatkan sebagai bertekstur seragam dan licin.

Tafsiran: Kehadiran fasies ini yang membentuk sebagai terumbu menunjukkan struktur stromatolit kompaun adalah terbentuk daripada hasil pemerangkapan sedimen yang berlaku secara berterusan. Arus tenaga yang kuat mampu untuk mengangkut sejumlah sedimen yang banyak bagi pemerangkapan sedimen pada bahagian atas topografi stromatolit untuk membentuk sebuah geometri kubah yang besar. Geometri kubah akan sentiasa kekal sekiranya sedimen mikrobial kerap diperangkap pada bahagian puncak stromatolit (Logan *et al.*, 1964). Walau bagaimanapun, tidak semua bahan sedimen berjaya diperangkap oleh mikro-organisma dan ini menyebabkan bahan sedimen yang selebihnya terendap pada bahagian dasar topografi struktur tersebut. Bahan sedimen ini kemudiannya dihakis oleh arus hingga membentuk sebagai sebuah struktur alunan yang seragam. Gabungan proses ini dilihat berlaku secara serentak dan berterusan hingga menghasilkan sebuah terumbu stromatolit berstruktur kompaun.

Fasies onkolit (Fso)

Huraian: Fasies yang membentuk bahagian dasar jujukan batu kapur di Perlis adalah didominasi oleh butiran onkoid. Pengelasan onkolit di dalam fasies mikrobial adalah merujuk kepada pembentukan yang terhasil daripada pengikatan bahan sedimen atau pemendakan mineral oleh hidupan mikro-organisma (Aitken, 1967). Setiap butiran onkoid dianggarkan berjulat saiz sekitar 2 mm hingga 1 cm dengan bentuk yang bercirikan subsudut hingga subbulat, bujur dan memanjang (Rajah 6). Isihan setiap butiran dikelaskan sebagai berisihan tidak baik kerana susunan butirannya yang terbentuk secara rawak dan tidak seragam. Dari sudut tekstur dalaman onkoid, butiran ini diisi oleh sedimen bersaiz halus berwarna gelap hasil daripada pengisian bahan organik seperti mikrit. Pembentukan laminasi yang kurang jelas menunjukkan jumlah kandungan bahan organik di dalam butiran onkoid adalah tidak sama hingga mempengaruhi kandungan tekstur warna di dalam butiran tersebut (Adams & MacKenzie, 1998). Selain daripada pengisian butiran onkoid, butiran-butiran lain seperti intraklas, bioklas dan peloid turut mengisi pada pelapisan batuan ini.

Tafsiran: Pembentukan fasies onkolit (Fso) pada bahagian bawah jujukan batu kapur memberi gambaran bahawa fasies ini berkemungkinan terbentuk di bahagian puncak hingga belakang terumbu yang dikawal oleh aktiviti ombak dan arus pasang surut air laut. Bentuk butiran onkoid yang bersifat seragam, bersaiz besar serta mengandungi pecahan kerangka pada bahagian nuklei membuktikan fasies ini adalah terbentuk di persekitaran marin. Pengaruh



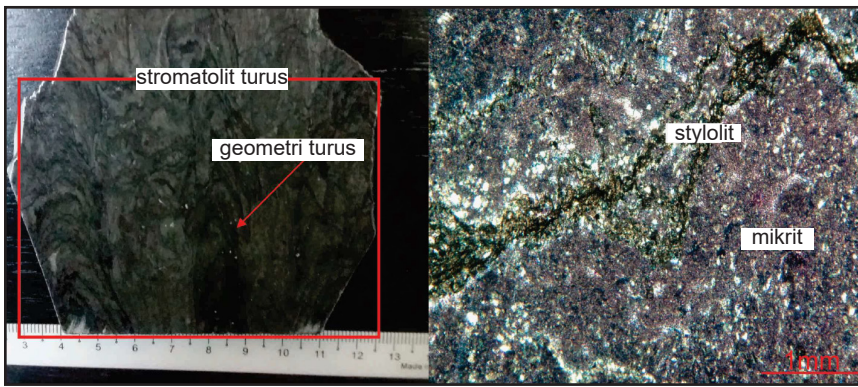
Rajah 6: Pembentukan batu kapur onkolit (Fso) yang terbentuk pada dasar jujukan batu kapur di kawasan Perlis. Fasies yang bercirikan butiran onkoid berbentuk subsudut hingga subbulat, bujur serta mengandungi sedimen hasil daripada pengisian bahan organik seperti mikrit.

arus gelora pada persekitaran ini menyebabkan penghasilan laminasi pada butiran onkoid menjadi pudar. Ini disebabkan pertumbuhan alga yang membentuk laminasi onkolit kerap kali terganggu dan musnah oleh aktiviti proses hidrodinamik (Flügel, 2004). Pembinaan fasies ini pada bahagian bawah jujukan juga menunjukkan butiran onkolit adalah terbentuk pada persekitaran yang agak dalam. Kajian mengenai taburan struktur mikrobialit oleh Aitken (1967) membuktikan fasies ini sering terbentuk di kawasan yang ditenggelami air laut iaitu di bawah paras minimum pasang surut air laut.

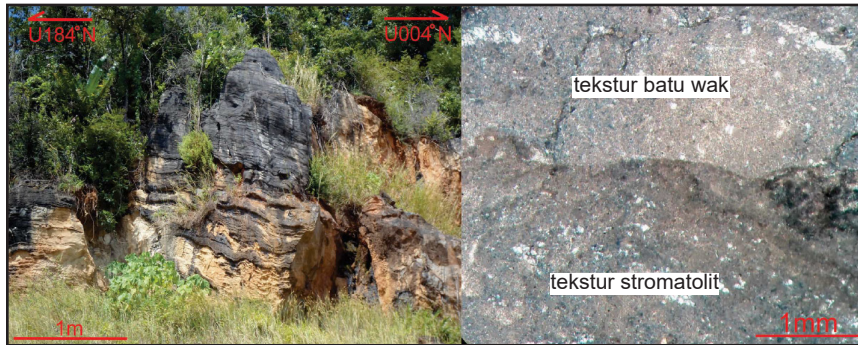
Fasies stromatolit berstruktur turus (Fst)

Huraian: Fasies ini turut mendominasi pada bahagian bawah jujukan batu kapur di kawasan Perlis. Bahagian dasar lapisan batu kapur ini terletak di atas fasies onkolit (Fso) yang kemudiannya berubah secara beransur-ansur menjadi struktur stromatolit apabila semakin ke bahagian atas jujukan. Struktur yang berbentuk turus dan kubah adalah sama seperti pengelasan stromatolit jenis susunan hemisferoid bertingkat yang diperkenalkan oleh Logan *et al.* (1964) dan Pratt & James (1982). Struktur ini terhasil daripada beberapa siri pembentukan sedimen mikrobial, dimana tekstur permukaannya bersifat seragam serta mengandungi sedimen bersaiz halus yang berwarna coklat keperangan (Rajah 7). Kandungan fabrik menunjukkan struktur dibentuk oleh butiran mikrit serta sedikit butiran peloid dan dolomit. Pembentukan mineral dolomit pada sebahagian struktur tersebut menunjukkan batuan ini telah mengalami proses diagenesis terutama pendolomitan. Struktur ini terbentuk dalam pengelasan mikrofases yang berbeza seperti batu lumpur, batu wak dan batu bebat. Struktur stromatolit yang terbentuk pada batu bebat diisi oleh butiran alokem yang terdiri daripada butiran onkoid, intraklas, bioklas dan peloid. Manakala, struktur stromatolit yang terbentuk pada batu lumpur dan batu wak hanya didominasi oleh butiran lumpur karbonat atau mikrit sahaja.

Tafsiran: Perubahan fasies yang berlaku daripada batu kapur onkolit (Fso) kepada stromatolit turus (Fst) menunjukkan penyusutan tenaga air laut apabila memasuki persekitaran yang terlindung. Ini dibuktikan dengan penguasaan mikrofases jenis batu padat dan batu wak



Rajah 7: Pembentukan fasies stromatolit turus (Fst) yang terbentuk pada dasar jujukan batu kapur di kawasan Perlis. Fasies yang bercirikan geometri bersifat turus dan mengandungi tekstur fabrik yang terdiri daripada fabrik mikrit dan butiran kerangka bioklas.



Rajah 8: Pembentukan stromatolit berstruktur alunan (Fsa) yang terbentuk pada jujukan tengah batu kapur di kawasan Perlis. Fasies yang bercirikan bentuk geometri hemisferoid beralun dan mengandungi tekstur fabrik yang terdiri daripada mikrit dan pecahan butiran kerangka.

yang terenap bersama dengan fasies stromatolit tersebut. Pengaruh daripada proses hidrodinamik turut mengawal pembentukan struktur stromatolit, di mana arus gelora yang bertindak pada struktur ini menyebabkan bahagian dasar stromatolit mengalami hakisan dan terpisah daripada jasad utama. Di dalam masa yang sama, pembinaan geometri berlekungan ke atas berlaku secara aktif pada bahagian puncak stromatolit. Ruang pertumbuhan yang luas diantara bahagian dasar topografi dengan paras air laut membolehkan kemasukan sedimen dibekalkan secara berterusan. Ini memudahkan aktiviti mikro-organisma untuk memerangkap bahan sedimen bagi membentuk stromatolit berbentuk turus (Reid *et al.*, 2003).

Fasies stromatolit berstruktur alunan (Fsa)

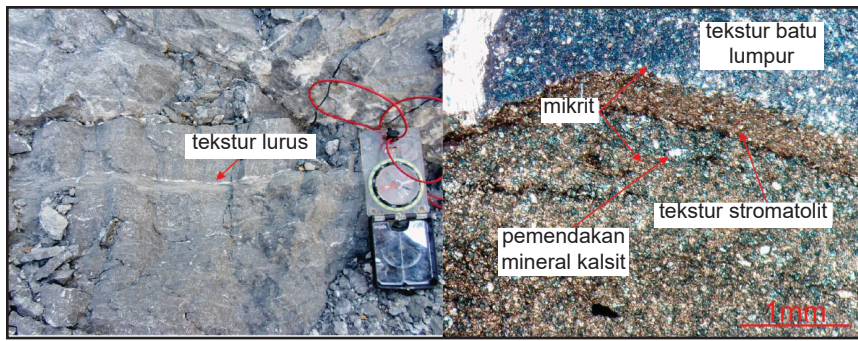
Huraian: Fasies stromatolit beralun adalah terbentuk secara dominan pada bahagian tengah jujukan batu kapur di kawasan daratan Perlis. Pola pembentukannya dilihat berubah secara beransur-ansur daripada stromatolit berstruktur turus kepada berstruktur alunan. Darjah sudut lengkungan yang terbuka, bentuk geometri hemisferoid yang semakin landai serta rangkaian struktur stromatolit yang bersambungan di antara satu sama lain merupakan pencirian utama bagi pembentukan struktur stromatolit dalam fasies ini (Rajah 8). Struktur stromatolit ini membentuk rantaian stromatolit hemisferoid seperti yang diperkenalkan oleh (Logan *et al.* (1964) dan Pratt & James (1982)). Tekstur dalaman struktur ini terhasil daripada siri pembentukan sedimen mikrobial yang bersaiz halus serta berwarna coklat keperangan iaitu sama seperti pencirian mesostruktur bagi fasies stromatolit berstruktur turus (Fst). Walau bagaimanapun, stuktur ini banyak terbentuk di dalam mikrofasies batu lumpur dan

batu wak, manakala sebahagian kecil di dalam batu padat. Pendominasian oleh batu lumpur dan batu wak menjelaskan pembentukan fasies ini adalah dalam sekitaran arus tenaga yang semakin berkurangan.

Tafsiran: Ciri-ciri fizikal yang ditunjukkan pada fasies ini memberi petunjuk bahawa proses pembentukannya turut dikawal oleh faktor kedalaman persekitaran serta pengaruh daripada proses hidrodinamik. Pembentukan struktur alunan yang bersifat landai adalah disebabkan ruang pertumbuhan stromatolit yang sempit. Ruang yang terhad menyebabkan jumlah kemasukan sedimen semakin berkurangan dan ini secara tidak langsung menyukarkan aktiviti pemerangkapan bahan sedimen oleh hidupan mikro-organisma. Kegagalan proses pemerangkapan sedimen ini menyebabkan aktiviti pertumbuhan stromatolit terganggu dan terbantut daripada terus membesar. Malahan, pengaruh daripada arus tenaga gelora serta proses kerukan yang bertindak semakin perlahan tidak mampu untuk menghakis bahagian dasar stromatolit secara aktif. Ini menyebabkan bahagian dasar stromatolit membentuk sebagai sebuah lengkungan yang terbuka dan menghasilkan struktur alunan bersifat landai.

Fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl)

Huraian: Fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl) merupakan salah satu fasies yang terdapat pada kedua-dua jujukan batu kapur di kawasan Langkawi dan Perlis. Fasies ini dicirikan oleh pembentukan struktur stromatolit yang wujud di antara perlapisan batu kapur. Walau bagaimanapun, struktur ini masih dapat dibezakan melalui sifat fizikalnya yang beralun pada darjah sudut yang sangat landai. Tekstur dalamannya bercirikan pengisian sedimen mikrobial bersaiz



Rajah 9: Pembentukan stromatolit berstruktur lurus (Fsl) yang terbentuk pada jujukan batu kapur di kawasan Perlis. Fasies yang bercirikan bentuk geometri alunan yang sangat landai dan mengandungi tekstur fabrik yang terdiri daripada mikrit.

halus berwarna coklat keperangan (Rajah 9). Fasies ini terbentuk bersama rekahan yang sangat dominan yang menandakan ianya terdedah kepada atmosfera dalam suatu tempoh masa yang agak lama. Fasies mikrobial ini terbentuk dalam batu lumpur hingga ke batu wak, di mana kandungan batuanannya adalah terdiri daripada bahan lumpur karbonat sahaja.

Tafsiran: Morfologi stromatolit berbentuk lurus dikenali sebagai laminasi kryptalgal yang terbentuk pada persekitaran supra-pasang surut (Pratt & James, 1982). Pembentukan geometri ini terbentuk pada kedalaman persekitaran yang cetek, di mana ruang pertumbuhan di antara dasar topografi dengan paras air laut adalah sangat sempit. Jumlah ruang yang terhad menyebabkan pertumbuhan stromatolit menjadi terbantu akibat daripada kesukaran hidupan mikro-organisma untuk memerangkap kemasukan bahan sedimen. Selain itu, kewujudan rekahan yang dominan pada fasies ini membuktikan bahawa ianya mengalami proses pengeringan yang ekstrem akibat terdedah kepada udara pada tempoh masa yang lama (Pratt & James, 1982; Cohen & Rosenberg, 1989; Decho, 2000; Flügel, 2004; Riding, 2011). Rekahan ini kemudiannya diisi semula oleh stromatolit apabila ditenggelami oleh air laut. Peristiwa ini dilihat berlaku secara berulang sehingga menghasilkan perselangan siri lapisan diantara stromatolit lurus dengan batu kapur.

TAFSIRAN PALEO-SEKITARAN FASIES MIKROBIAL

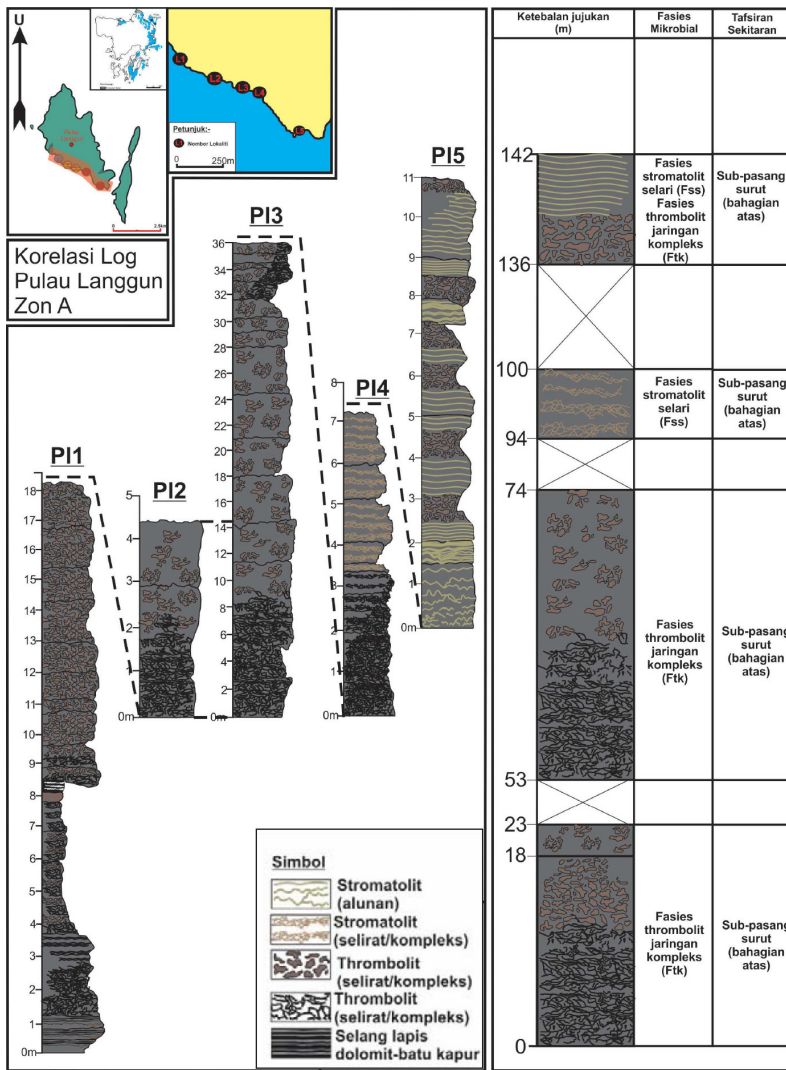
Penguasaan fasies thrombolit berstruktur jaringan kompleks (Ftk) pada bahagian dasar jujukan batu kapur Setul Bawah di Pulau Langgun membuktikan jujukan tersebut telah diendapkan di persekitaran sub-pasang surut (Rajah. 10). Pembentukan struktur selirat yang kompleks adalah disebabkan kawasan persekitaran ini dikawal sepenuhnya oleh arus pasang surut serta aktiviti ombak yang bertindak dari pelbagai arah yang berlainan. Menurut, Pratt & James (1982), pengaruh daripada arus ombak serta arus pasang surut yang berubah menyebabkan taburan sedimen yang terperangkap pada hamparan alga menjadi tidak sekata hingga menghasilkan struktur reranting dan bercabang. Perbandingan yang dibuat pada thrombolit berusia Ordovisi pada jujukan Kumpulan St. George di Newfoundland menunjukkan persamaan dari sudut pengaruh pembentukannya (Pratt & James, 1982). Kedua-dua thrombolit ini terhasil daripada beberapa faktor utama,

antaranya seperti (1) ketidakseragaman pegenapan sedimen mikrobial, (2) masa pegenapan yang tidak seragam, (3) jumlah taburan sedimen yang tidak teratur dan (4) bentuk permukaan topografi yang tidak sekata.

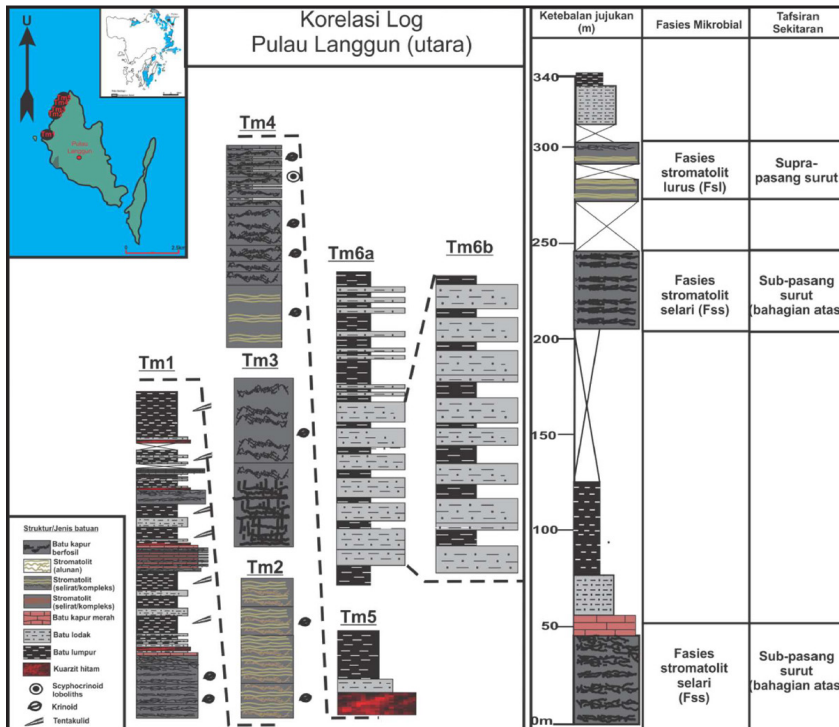
Perubahan geometri struktur thrombolit kepada struktur stromatolit selari pada bahagian tengah jujukan di Pulau Langgun menunjukkan fasies ini turut terendap di persekitaran sub-pasang surut (cerun atas) (Rajah 10 & 11). Penyusutan tenaga daripada arus gelora yang hanya bertindak pada tempoh masa tertentu telah membawa kepada penghasilan tekstur selirat yang tersusun secara selari dengan perlapisan batu kapur.

Bagi pembentukan fasies mikrobial di kawasan Perlis pula, bahagian dasar jujukan ini dibentuk oleh terumbu stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa) serta fasies onkolit (Fso) (Rajah 12). Struktur stromatolit yang disifatkan sebagai geometri berlingkungan ke atas serta penguasaan butiran onkoid menandakan persekitaran ini dikawal sepenuhnya oleh kedalaman persekitaran dan proses hidrodinamik. Ini menyebabkan interaksi yang berlaku di antara hidupan mikro-organisma dengan pemerangkapan sedimen mikrobial akan berlaku secara aktif. Persekitaran terumbu kebiasaannya dipengaruhi oleh arus gelora, di mana bahagian dasar topografi sering terdedah kepada hakisan hingga membentuk sebagai geometri beralun. Arus gelora ini turut memusnahkan pertumbuhan alga pada bahagian dalam butiran onkolit (Flügel, 2004). Perbandingan di antara terumbu karbonat di kawasan Perlis menunjukkan tafsiran persekitaran adalah sama seperti terumbu stromatolit kuno, di mana hidupan cyanobakteria ini sering menguasai pada persekitaran terumbu karbonat (Flügel, 2004).

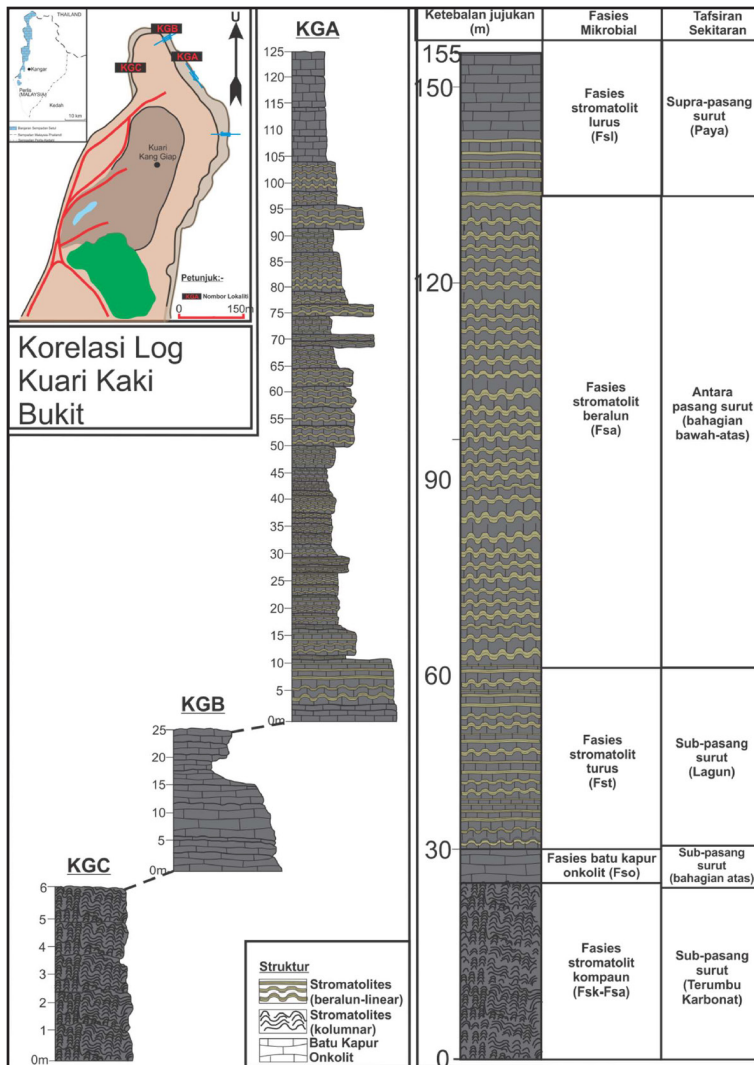
Di atas pengendapan fasies stromatolit kompaun dan fasies onkolit, struktur stromatolit mula mengalami perubahan kepada fasies stromatolit berstruktur lurus (Fst) dan fasies stromatolit berstruktur alunan (Fsa) (Rajah 12). Pembentukan fasies yang berubah secara beransur-ansur menunjukkan pembentukannya dikawal oleh faktor kedalaman persekitaran yang semakin cetek ke atas (Pratt & James, 1982). Persekitaran sub-pasang surut dan antara pasang surut merupakan kawasan yang sesuai bagi pertumbuhan stromatolit jenis lurus dan beralun. Ini disebabkan pengaruh arus tenaga yang bertindak dari arah yang sama serta ruang pertumbuhan yang luas memudahkan pemerangkapan sedimen mikrobial untuk membentuk stromatolit secara seragam. Pengendapan bahan sedimen



Rajah 10: Log sedimen zon A, kawasan Pulau Langgun yang terdiri daripada fasies thrombolit jaringan kompleks (Ftk) dan fasies stromatolit berstruktur selari (Fss).



Rajah 11: Log sedimen zon B, kawasan Pulau Langgun yang terdiri daripada fasies stromatolit berstruktur selari (Fss) dan fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl).



Rajah 12: Log sedimen lokaliti 1 di kawasan Kaki Bukit, Perlis yang terdiri daripada fasies onkolit (Fso), fasies stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa), fasies stromatolit berstruktur turus (Fst), fasies stromatolit berstruktur alunan (Fsa) dan fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl).

daripada batu bebat hingga batu lumpur turut membuktikan persekitaran ini mengalami penyusutan arus tenaga apabila memasuki kawasan yang terlindung seperti lagun.

Bahagian paling atas jujukan batu kapur di Perlis adalah didominasi oleh pembentukan fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl) (Rajah 12). Fasies ini ditafsirkan terendap pada persekitaran supra-pasang surut iaitu kawasan yang sering kali terdedah kepada udara dan hanya mengalami penenggelaman apabila paras air laut berada di tahap maksimum (Nichols, 2009). Proses pertumbuhan stromatolit hanya akan berlaku semasa kawasan tersebut ditenggelami air apabila paras air laut berada di tahap maksimum. Semasa paras air laut berada di tahap minimum, jasad stromatolit akan terdedah kepada udara dan mengalami proses pengeringan yang ekstrem hingga menghasilkan struktur rekahan yang dominan (Gerdes *et al.*, 1993; 2000). Rekahan ini kemudiannya diisi semula oleh sedimen mikrobial apabila paras air laut meningkat bagi menandakan episod baru bagi pertumbuhan stromatolit.

MODEL PALEO-SEKITARAN

Sebuah model paleo-sekitaran telah dibina berdasarkan pentafsiran fasies mikrobial yang terbentuk pada jujukan

Batu Kapur Setul di kawasan Pulau Langgun dan Perlis (Rajah 13). Pencirian fizikal pada jujukan ini menunjukkan keseluruhan fasies terbentuk pada persekitaran karbonat laut cetek. Geometri struktur mikrobial yang berubah secara beransur-ansur menunjukkan faktor kedalaman persekitaran dan pengaruh hidrodinamik memainkan peranan utama di dalam pembentukan struktur stromatolit dan thrombolit tersebut. Sekitaran endapan bagi fasies mikrobial ditafsirkan membentuk pada persekitaran sub-pasang surut hingga supra-pasang surut, di mana kawasan ini mempunyai kedalaman persekitaran yang berbeza serta turut dipengaruhi oleh aktiviti ombak dan pasang surut air laut.

Perbandingan diantara fasies mikrobial pada jujukan Batu Kapur Setul dengan struktur mikrobial kuno di kawasan lain membuktikan hidupan mikrobial ini sering menguasai di persekitaran karbonat laut cetek iaitu meliputi kawasan supra-pasang surut, antara pasang surut dan sub-pasang surut (Logan *et al.*, 1964; Aitken, 1967; Ahr, 1971; Luchinina, 1975; Rowland & Gangloff, 1988; Freyret & Verrecchia, 1999). Antara contoh pertumbuhan stromatolit dan thrombolit yang terbentuk di persekitaran karbonat laut cetek pada masa kini adalah seperti di kawasan Shark

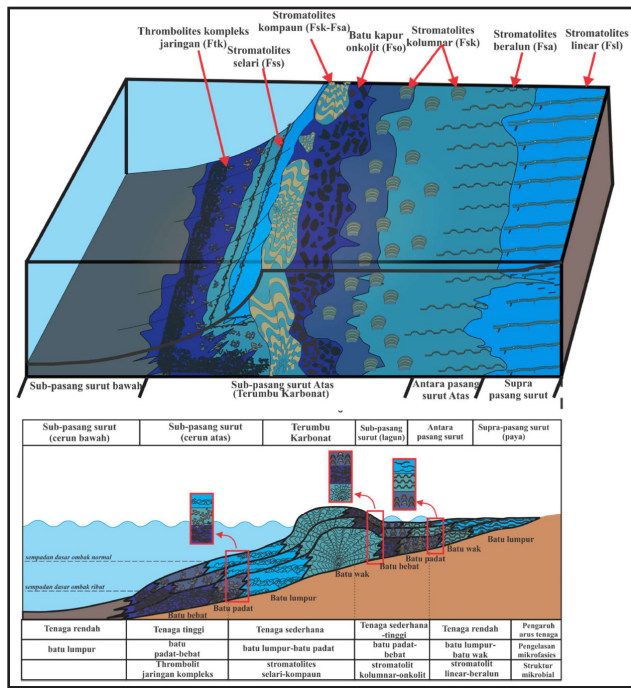
Bay, Australia dan Kepulauan Lee Stocking, Bahamas (Riding, 2011).

KESIMPULAN

Pembentukan struktur stromatolit, thrombolit dan onkolit pada jujukan Batu Kapur Setul memberi gambaran bahawa kawasan ini dahulunya adalah aktif dengan aktiviti daripada hidupan mikro-organisma seperti cyanobakteria dan alga. Perbandingan sekitaran endapan bagi pertumbuhan stromatolit dan thrombolit di seluruh dunia menunjukkan struktur ini mendominasi di kawasan zon pasang surut seperti supra-pasang surut, antara pasang surut dan sub-pasang surut terutama sekali pada pembentukan struktur mikrobialit kuno (Flügel, 2004).

Hasil pencirian sifat fizikal bagi setiap struktur mikrobialit telah membahagikan struktur ini kepada beberapa pengelasan fasies utama antaranya seperti fasies thrombolit jaringan kompleks (Ftk), fasies stromatolit berstruktur selari (Fss), fasies stromatolit berstruktur kompaun (Fst-Fsa), fasies onkolit (Fso), fasies stromatolit berstruktur turus (Fst), fasies stromatolit berstruktur alunan (Fsa) dan fasies stromatolit berstruktur lurus (Fsl).

Bahagian dasar jujukan batu kapur Setul Bawah di kawasan Pulau Langgun dicirikan oleh batu kapur yang dilihat sebagai berlapis tebal, berwarna kelabu gelap dan didominasi dengan pembentukan thrombolit dan stromatolit berstruktur selari. Pertumbuhan struktur mikrobial secara



Rajah 13: Tafsiran paleo-sekitaran fasies mikrobial bagi jujukan Batu Kapur Setul. Jujukan batu kapur di Pulau Langgun meliputi persekitaran sub-pasang surut, manakala jujukan di Perlis merangkumi persekitaran terumbu karbonat, antara pasang surut dan supra-pasang surut. Model persekitaran ini merujuk kepada model pelantar karbonat di kawasan karbonat berlaut cetek.

Jadual 1: Sifat fizikal dan pengelasan fasies mikrobial di dalam pentafsiran sekitaran endapan jujukan batu kapur Setul.

Fasies	Struktur mikrobial	Geometri struktur	Pola jujukan	Jenis mikrofasis	Pengaruh pembentukan fasies	Sekitaran pengendapan
Fsl	Stromatolit lurus	-Lengkungan landai		Batu lumpur -lumpur karbonat	Faktor utama: Kedalaman persekitaran (kemasukan sedimen yang terhad, ruang pertumbuhan semakin sempit)	Supra-pasang surut (paya)
Fsa	Stromatolit alunan	-Lengkungan terbuka		Batu wak dan batu lumpur -lumpur karbonat	Faktor sampingan: arus tenaga bersifat sederhana ke lemah (Proses kerukan tidak begitu aktif)	Antara pasang surut
Fst	Stromatolit turus	-Lengkungan rapat -jasad terasing		Batu bebat, batu padat dan batu wak -peloid, bioklas, intraklas dan lumpur karbonat	Faktor utama: Kedalaman persekitaran (kemasukan sedimen secara berterusan, ruang pertumbuhan yang luas)	Sub-pasang surut (lagun)
Fso	Onkolit	-Butiran onkoloid bersaiz besar		Rudstone -onkolit	Faktor utama: Kedalaman persekitaran (sentiasa terbentuk di bawah paras minimum pasang surut)	Sub-pasang surut (bahagian belakang terumbu stromatolites)
Fst-Fsa	Stromatolit kompaun	-Gabungan struktur turus dan alunan		Batu bebat -bioklas, intraklas, peloid	Faktor utama: Kedalaman persekitaran+arus tenaga air (bekalan sedimen secara berterusan, proses kerukan pada dasar topografi)	Sub-pasang surut (bahagian depan dan puncak terumbustromatolit)
Fss	Stromatolit selari	-jaringan kompleks -tersusun selari		Batu wak dan batu padat -bioklas dan lumpur karbonat	Faktor utama: -arus tenaga (ombak dan pasang surut bertindak dari pelbagai arah) -arus tenaga bertindak pada masa yang tertentu	Sub-pasang surut (cerun atas)
Ftk	Thrombolit	-jaringan kompleks -terenap secara rawak		Batu bebat -peloid -bioklas	Faktor utama: Kedalaman persekitaran Faktor utama: -arus tenaga (ombak dan pasang surut bertindak dari pelbagai arah) -proses kerukan, enapan sedimen mikrobial di dasar topografi -masa, topografi dan taburan sedimen yang tidak seragam	Sub-pasang surut (cerun atas)

aktif pada jujukan ini ditafsirkan terbentuk pada persekitaran cerun atas di zon sub-pasang surut. Ini dibuktikan dengan pencirian sifat fizikal struktur tersebut yang dipercayai terhasil dan dikawal sepenuhnya oleh tenaga arus gelora yang maksimum.

Cerapan pada bahagian tengah dan atas jujukan batu kapur di kawasan Perlis menunjukkan pembentukan fasies mikrobial yang berbeza iaitu terdiri daripada stromatolit berstruktur kompaun, turus, beralun dan lurus. Malahan butiran onkolit turut terbentuk bersama pada jujukan tersebut. Pembentukan fasies ini ditafsirkan terbentuk pada persekitaran terumbu karbonat, antara pasang surut dan supra-pasang surut. Perubahan dari sudut geometri dan topografi struktur mikrobialit menandakan kedalaman persekitaran adalah semakin cetek akibat daripada ruang pertumbuhan yang menjadi semakin sempit.

Kepelbagaian bentuk mikrobialit memberi tafsiran bahawa pembentukan fasies adalah dikawal sepenuhnya oleh faktor kedalaman persekitaran yang dipengaruhi oleh faktor hidrodinamik, biologi dan kimia. Kesemua faktor-faktor ini dilihat berlaku secara serentak melalui gabungan aktiviti daripada aktiviti mikro-organisma (biologi) untuk memerangkap bahan sedimen yang dibawa masuk oleh arus tenaga air (hidrodinamik) di kawasan ruang pertumbuhan yang luas (persekitaran). Segala maklumat mengenai sifat fizikal struktur mikrobialit, jenis fasies, pengaruh arus tenaga serta tafsiran sekitar endapan telah diuraikan secara ringkas pada Jadual 1.

PENGHARGAAN

Sekalung penghargaan kepada Prof. Dr. Lee Chai Peng di atas kritikan membina terhadap penyemakan yang dibuat pada penerbitan ini. Terima kasih juga diucapkan kepada pihak Universiti Kebangsaan Malaysia yang membiayai kerja lapangan melalui geran FRGS/2/2014/STWN06/UKM/01/1 bagi tujuan penerbitan hasil kajian ini.

RUJUKAN / REFERENCES

- Adams, A. & MacKenzie, I.R., 1998. Carbonate Sediments and Rocks Under the Microscope: A Colour Atlas. CRC Press. 180p.
- Ahr, W.M., 1971. Paleoenvironment, algal structures, and fossil algae in the Upper Cambrian of central Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1), 205-216.
- Aitken, J.D., 1967. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta. *Journal of Sedimentary Research*, 37(4), 1163-1178.
- Ali, C.A. & Mohamed, K.R., 2013. Microfacies and diagenesis in the Setul Limestone in Langkawi and Perlis. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 59, 59-66.
- Burne, R.V. & Moore, L.S., 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios*, 2(3), 241-254.
- Bosak, T., Knoll, A.H. & Petroff, A.P., 2013. The meaning of stromatolites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41, 21-44.
- Cohen, Y. & Rosenberg, E., 1989. Microbial mats: physiological ecology of benthic microbial communities. *American Society for Microbiology*, Washington, D.C., 22-36.
- Cocks, L.R.M., Fortey, R.A. & Lee, C.P., 2005. A review of Lower and Middle Palaeozoic biostratigraphy in west peninsular Malaysia and southern Thailand in its context within the Sibumasu Terrane. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(6), 703-717.
- Decho, A.W., 2000. Microbial biofilms in intertidal systems: an overview. *Continental shelf research*, 20(10), 1257-1273.
- Dongjie, T., Xiaoying, S., Ganqing, J., Yunpeng, P., Wenhao, Z., Yuan, W. & Min, L., 2013. Environment controls on Mesoproterozoic thrombolite morphogenesis: a case study from the North China Platform. *Journal of Palaeogeography*, 2(3), 275-296.
- Flügel, E., 2004. Microfacies data: matrix and grains. In: *Microfacies of Carbonate Rocks*, Springer, Berlin Heidelberg, 73-176.
- Freytet, P. & Verrecchia, E. P., 1999. Calcitic radial palisadic fabric in freshwater stromatolites: diagenetic and recrystallized feature or physicochemical sinter crust? *Sedimentary Geology*, 126(1-4), 97-102.
- Garrett, P., 1970. Phanerozoic stromatolites: noncompetitive ecologic restriction by grazing and burrowing animals. *Science*, 169, 171-173.
- Gerdes, G., Claes, M., Dunajtschik-Piewak, K., Riege, H., Krumbein, W.E. & Reineck, H.E., 1993. Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures. *Facies*, 29(1), 61.
- Gerdes, G., Krumbein, W.E. & Noffke, N., 2000. Evaporite microbial sediments. In: *Microbial sediments*. Springer, Berlin Heidelberg, 196-208.
- Grotzinger, J.P., 1989. Facies and evolution of Precambrian carbonate depositional systems: emergence of the modern platform archetype. In: *Crevello, P.D., Wilson J.L., Sarg, J.F., JF Read, J.F. (Eds.), Controls on Carbonate Platform and Basin Development*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ., 44, 79-106.
- Grotzinger, J.P. & Knoll, A. H., 1999. Stromatolites in Precambrian carbonates: Evolutionary mileposts or environmental dipsticks? *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 27, 313-358.
- Hassan, M.H. & Lee, C.P., 2002. Stratigraphy of the Jentik Formation, the transitional sequence from the Setul Limestone to the Kubang Pasu Formation at Guar Sanai, Guar Jentik, Beseri, Perlis - a preliminary study. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 45, 171 -178.
- Hassan, M.H. & Lee, C.P., 2005. The Devonian-Lower Carboniferous succession in Northwest Peninsular Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(6), 719-738.
- Hofmann, H.J., 1969. Attributes of stromatolites. *Geological Survey of Canada Paper*, 69(39), 58.
- Jones, C.R., 1968. Lower Paleozoic rocks of Malay peninsula. *AAPG Bulletin*, 52(7), 1259-1278.
- Jones, C.R., 1981. The Geology and Mineral Resources of Perlis, North Kedah and the Langkawi Islands. *Geological Survey of Malaysia Memoir*, 17, 257.
- Kahle, C.F., 2001. Biosedimentology of a Silurian thrombolite reef with meter-scale growth framework cavities. *Journal of Sedimentary Research*, 71(3), 410-422.
- Kobayashi, T. & Hamada, T., 1973. Cyrtosymbolids (Trilobita) from the Langgun Red Beds in Northwest Malaya, Malaysia. *Geology and Palaeontology of Southeast Asia*, 12, 1-28.
- Logan, B.W., Rezak, R. & Ginsburg, R.N., 1964. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *The Journal of Geology*, 72(1), 68-83.
- Luchinina, V. A., 1975. Paleogeological characteristics of the Early Cambrian of the southeastern Siberian platform. *Nauka, Novosibirsk*, 100 p.

- Mazzullo, S.J. & Friedman, G.M., 1977. Competitive algal colonization of peritidal flats in a schizohaline environment: The Lower Ordovician of New York. *Journal of Sedimentary Research*, 47(1), 398-410.
- Nichols, G., 2009. Shallow Marine Carbonate and Evaporite Environments. In: *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons, 225-246.
- Playford, P.E., Low, G.H. & Cockbain, A.E., 1976. Geology of the Perth Basin, Western Australia. Geological Survey of Western Australia. Geological Survey of Western Australia, Perth. 310 p.
- Pratt, B.R. & James, N.P., 1982. Cryptalgal-metazoan bioherms of early Ordovician age in the St George Group, western Newfoundland. *Sedimentology*, 29(4), 543-569.
- Reid, R.P., James, N.P., Macintyre, I.G., Dupraz, C.P. & Burne, R.V., 2003. Shark Bay stromatolites: microfabrics and reinterpretation of origins. *Facies*, 49(1), 299.
- Riding, R., 2006. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic–Cambrian changes in atmospheric composition. *Geobiology*, 4(4), 299-316.
- Riding, R., 2011. The nature of stromatolites: 3,500 million years of history and a century of research. In: *Advances in stromatolite geobiology*. Springer Berlin Heidelberg, 29-74.
- Rowland, S.M. & Gangloff, R.A., 1988. Structure and paleoecology of Lower Cambrian reefs. *Palaios*, 3, 111-135.
- Semikhatov M.A. & Raaben M. E., 2000. Proterozoic stromatolite taxonomy and biostratigraphy. *Microbial sediments*. Springer, Berlin, Heidelberg. 295-306.
- Shapiro, R.S. & Awramik, S.M., 2006. Favosamaceria cooperi new group and form: a widely dispersed, time-restricted thrombolite. *Journal of Paleontology*, 80(3), 411-422.
- Walter, M.R. & Heys, G.R., 1985. Links between the rise of the Metazoa and the decline of stromatolites. *Precambrian Research*, 29(1-3), 149-174.

Manuscript received 23 September 2017

Revised manuscript received 17 July 2018

Manuscript accepted 28 July 2018