

## Pemendapan Sedimen dan Proses $^{210}\text{Pb}$ di Lembangan Melayu dan Selat Melaka (Sedimentary Deposition and Process of $^{210}\text{Pb}$ in Malay Basin and Straits of Malacca)

MOHAMAD ARIF CHE ABD RAHIM<sup>1</sup>, SHENGFA LIU<sup>2,3</sup>, XUEFA SHI<sup>2,3</sup> & CHE ABD RAHIM MOHAMED<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Environmental and Natural Resources Science, Faculty of Science & Technology,  
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural  
Resources, Qingdao, China*

<sup>3</sup>*Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, China*

*Diserahkan: 10 April 2022/Diterima: 14 November 2022*

### ABSTRAK

Sebanyak dua teras sedimen diperoleh dari Lembangan Melayu dan Selat Melaka bagi mengenal pasti pemendapan sedimen serta proses  $^{210}\text{Pb}$  di Lembangan Melayu dan Selat Melaka. Di kawasan kajian, purata aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  adalah sebanyak  $111.47 \pm 15.01$  Bq/kg dan  $126.38 \pm 16.8$  Bq/kg di stesen M17 dan M43 dengan perbezaan antara stesen adalah sebanyak 10%. Kedua-dua stesen menerima input yang berlainan melalui saluran air ke arah kawasan persampelan, menyebabkan peningkatan kandungan  $^{210}\text{Pb}$  di dalam sedimen. Proses hidrologi yang dikawal melalui perbezaan temporal turut mempengaruhi proses fizikal dan secara tidak langsung, mempengaruhi proses sedimentasi. Proses hidrologi melalui perbezaan temporal yang mempengaruhi proses fizikal dan kemudiannya mempengaruhi kadar proses pemendapan. Memandangkan sistem monsun mempengaruhi daya kitaran hidrologi, mekanisme timbal-balik kesan saiz butiran terhadap  $^{210}\text{Pb}$  telah berubah berikutan pengaruh arus monsun bersama dengan lempung sebagai pembawa utama yang menonjol untuk teras sedimen, sekali gus mempunyai kesan serta-merta pada pemendapan sedimen. Di samping itu, inventori dan fluks Lembangan Melayu dan Selat Melaka menunjukkan kesan monsun juga menyumbang kepada perubahan inventori dan fluks  $^{210}\text{Pb}$  di Lembangan Melayu dan Selat Melaka apabila daya kitaran hidrologi mengubah keupayaan kesan penggarutan  $^{210}\text{Pb}$  di sekitar perantaraan sedimen dan air laut.

Kata kunci: Lembangan Melayu; pemendapan sedimen; proses endapan; Selat Melaka;  $^{210}\text{Pb}$

### ABSTRACT

A total of two sediment core were acquired from the Malay Basin and the Straits of Malacca to investigate sedimentary deposition and process of  $^{210}\text{Pb}$ . At the site studied, the average  $^{210}\text{Pb}$  activity were  $111.47 \pm 15.01$  Bq/kg and  $126.38 \pm 16.8$  Bq/kg at M17 and M43, respectively, with difference of both stations at 10%. Both stations receive a different sediment input from each region which supplies to respective water masses, thus leading to the elevated  $^{210}\text{Pb}$  concentration in both stations. Hydrological processes through temporal difference affecting the physical processes and later influence the rate of sedimentation processes. Since monsoonal system affecting the motion of hydrological forces, the response of mechanism of grain size effect towards  $^{210}\text{Pb}$  were altered following monsoonal-induced current in conjunction with clay as prominent carrier for both sediment cores, thus having an immediate effect on the current sedimentary deposition. In addition, inventories and flux of Malay Basin and Straits of Malacca shows the monsoonal effect as main contributor for the several hydrological forces affecting the  $^{210}\text{Pb}$  along with effective scavenging of  $^{210}\text{Pb}$  between water-sediment interface thus affecting the total  $^{210}\text{Pb}$  flux and inventories in sediment core.

Keywords: Malay Basin; sedimentary deposition; sedimentary process; Straits of Malacca;  $^{210}\text{Pb}$

### PENGENALAN

Salah satu sumber utama sedimen ke arah pesisir pantai adalah melalui lembangan saluran dengan pantai bertentangan adalah kawasan pemendapan utama bagi

bahan organik dan bukan organik. Input saluran juga memainkan peranan penting sebagai mengawal kitaran kimia global sambil membekalkan sedimen dalam persekitaran marin (Watson et al. 2018). Pemendapan

sedimen di pesisir pantai terdiri daripada beberapa ciri seperti karbonat, bahan organik dan opal biogenik yang mempunyai banyak maklumat dan nilai sejarah. Menurut Liu et al. (2017), ciri utama seperti perubahan aras laut, perbezaan sumber dan pemendapan sedimen, perbezaan pengaruh arus pada kedalaman air yang pelbagai serta perubahan iklim tropika yang membawa kepada variasi temporal dan ruang yang kuat sehingga mengakibatkan perubahan dalam komposisi fizikal dan kimia sedimen. Dalam aliran arus air, sedimen bersaiz halus merupakan pengangkut bahan organik dan bukan organik. Perubahan dalam mekanisme pemendapan akan membawa kepada kepelbagaian pecahan tekstur, sekali gus membawa kepada variasi komposisi kimia kerana tekstur sedimen memainkan peranan penting untuk menampung bahan organik dan bukan organik (Zhao et al. 2017).

Kawasan pemendapan yang terdapat di Tanah Sunda ialah Lembangan Melayu dan Selat Melaka dengan kedua-duanya terdedah kepada daya hidrologi luar seperti kemasukan arus air, angkutan Ekman dan perubahan monsun. Laut China Selatan bertanggungjawab untuk input di Lembangan Melayu manakala Laut Andaman bertanggungjawab untuk Selat Melaka. Selat Melaka terletak di antara pantai barat Semenanjung Malaysia dan pantai timur Sumatera. Aliran airnya disambungkan ke pelantar Sunda di bahagian selatan Laut China Selatan. Kedalaman airnya adalah antara 30 m di selatan dan meningkat dengan kedalaman kira-kira 200 m yang menghubungkan Laut Andaman. Laut pelantarnya pula yang terletak melepasi Zon Ekonomi Eksklusif (ZEE) Semenanjung Malaysia, mempunyai kedalaman yang melebihi 1000 m (Rizal et al. 2012). Sebaliknya, Lembangan Melayu pula menerima sumber daripada pantai timur Semenanjung Malaysia, dengan wilayah jiran yang terdiri daripada Thailand dan Kemboja, menyumbang kepada pemendapan di kawasan tersebut. Kedalaman airnya adalah antara 50 hingga 100 m dan lebih kurang mempunyai jumlah hujan tertinggi 2000 mm semasa sistem monsun (Daud, Akhir & Husain 2016; Kok et al. 2017).

Radionuklid semula jadi,  $^{210}\text{Pb}$  sangat berguna bagi penyelidik kerana ia berfungsi sebagai instrumen untuk mengesan perubahan yang terdapat dalam persekitaran yang terjejas daripada sumber semula jadi atau antropogenik.  $^{210}\text{Pb}$  yang mempunyai separuh hayat 22.3 tahun telah digunakan secara meluas sebagai alat utama untuk mengkaji perubahan dalam pemendapan sedimen pada persekitaran sedimen yang berbeza dan kajian antropogenik yang memfokuskan kepada pencemaran (Bonotto & Garcia-Tenorio 2019). Beberapa

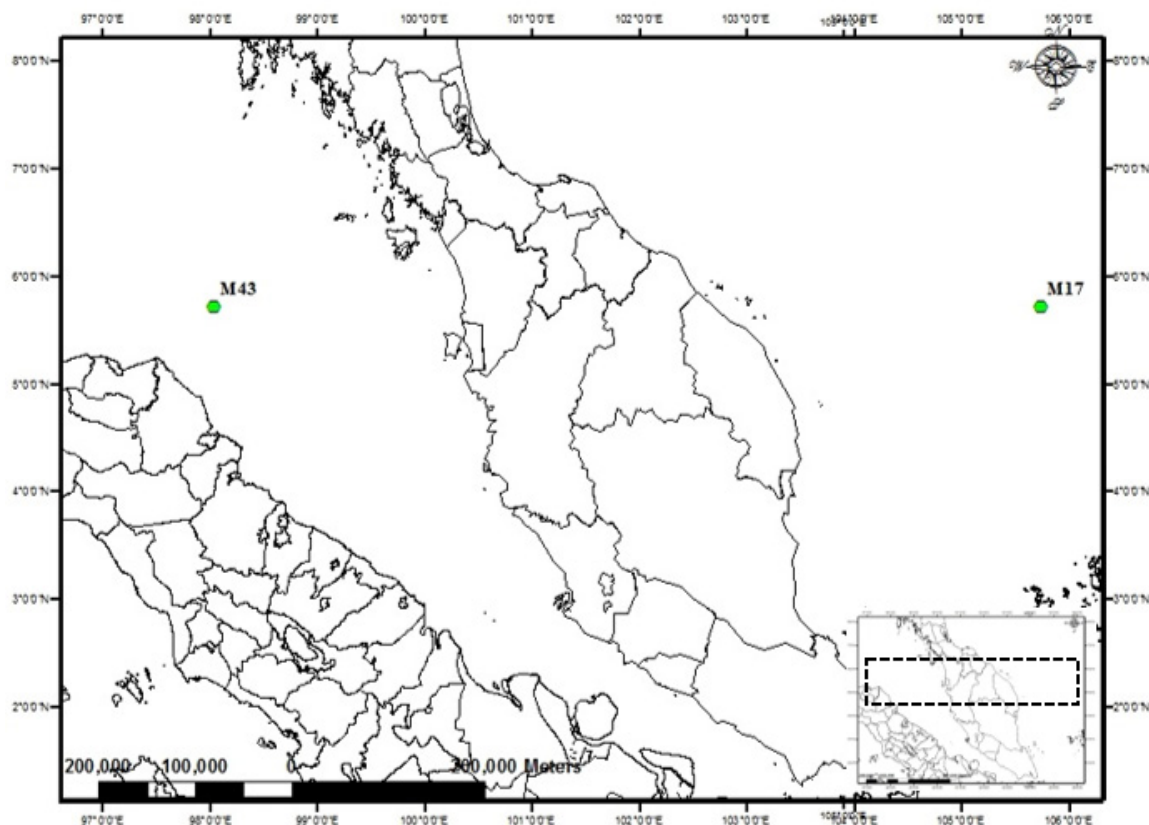
aplikasi  $^{210}\text{Pb}$  yang boleh digunakan adalah sebagai pengesanan untuk sumber dan pemendapan, geokronologi, angkutan atmosfera dan zarah dalam persekitaran marin (Mohamad Arif et al. 2021; Wei et al. 2011). Dalam masa yang sama, pengurangan  $^{210}\text{Pb}$  yang tidak disokong seiring dengan kedalaman dalam profil menegak, perolehan maklumat ini akan menjadi berguna kerana dapat menerangkan variasi pemendapan sedimen dari sepanjang tahun kronologi yang dicarta daripada  $^{210}\text{Pb}$ . Daripada profil menegak  $^{210}\text{Pb}$ , variasi dalam pengagihan lebihan  $^{210}\text{Pb}$  dijana melalui pemendapan basah (jumlah hujan tahunan) dan kering (pengangkutan dan pemendapan atmosfera), pemineralan semula atau zarah melalui teras bawah dan input tambahan  $^{210}\text{Pb}$  melalui pereputan *in-situ*  $^{226}\text{Ra}$  atau melalui  $^{222}\text{Rn}$  (Baskaran et al. 2014).

Oleh kerana sumbangan  $^{210}\text{Pb}$  sebagai instrumen utama dalam mengenal pasti proses semula jadi dalam oseanografi dan sistem bumi, maka  $^{210}\text{Pb}$  berguna untuk menilai input melalui fluvial atau sumber yang berasaskan dari atmosfera ke pantai (Nozaki, Ikuta & Yashima 1990). Memandangkan kajian tentang radionuklid semula jadi adalah terhad di Tanah Sunda, penambahan maklumat mengenai  $^{210}\text{Pb}$  sebagai pengesan geokimia dalam persekitaran akuatik sedikit sebanyak dapat mengenal pasti ciri Lembangan Melayu dan Selat Melaka sebagai kawasan pemendapan utama. Bagi mengisi kekosongan kajian radioaktiviti marin dari segi proses alam sekitar, objektif kajian ini adalah untuk menganggar pemendapan sedimen dan proses  $^{210}\text{Pb}$  di Lembangan Melayu dan Selat Melaka.

#### BAHAN DAN KAEDAH

Dua stesen persampelan telah dipilih di Lembangan Melayu dan Selat Melaka untuk menilai kadar pemendapan. M17 terletak di hujung sempadan zon eksklusif ekonomi (ZEE), menghadap kawasan selatan Laut China Selatan (sSCS) dan pantai Vietnam (M17: 105° 44' 23.99" N, 5° 43' 11.99" E; kedalaman air: 66.20 m), manakala M43 terletak di pinggir utara Selat Melaka, menghadap Laut Andaman dan Teluk Martaban (M43: 98° 2' 24" N, 5° 43' 11.99" E; kedalaman air: 103.00 m). Kedua-dua sampel teras diperolehi melalui turus graviti pada September 2017 bagi kedua-dua stesen dengan menggunakan RV Discovery. Sampel telah disub-sampel pada selang 2 cm untuk kedua-dua teras sedimen.

Analisis tekstur sedimen dijalankan dengan menggunakan 2 g sampel pukal yang telah dikeringkan dan dicampur dengan larutan Calgon dalam tiub emparan



RAJAH 1. Kawasan persampelan M17 dan M43 di Tanah Sunda

50 mL (Kaur & Fanourakis 2018). Untuk jumlah serakan, sampel dimasukkan ke dalam ultrasonik selama 1 jam dan penggoncang timbal balik selama 15 minit. Untuk pengasingan antara lempung, kelodak dan pasir, tiub itu diempar selama tiga minit pada 750 rpm dan tanah liat diambil dengan menggunakan pipet pada 2.5 cm dari atas tiub emparan dan dipindahkan ke kerajang aluminium yang ditimbang beratnya sebelum dikeringkan, manakala pasir diayak pada 300 mesh. Peratusan kelodak dihitung selepas memperoleh peratusan lempung dan pasir.

Kaedah Walkley Black yang diubah suai digunakan untuk menganggar jumlah kandungan karbon organik (TOC) dengan 1 g sedimen pukal digunakan dan dicampur dengan 10 mL 1 N kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) dan 20 mL larutan gabungan [ $H_2SO_4$  pekat dan perak sulfat ( $Ag_2SO_4$ )] ke dalam kelalang kon 500 mL (Mebius 1960; Schumacher 2002). Sampel dikacau perlahan-lahan bagi meratakan percampuran dan dipanaskan pada plat panas yang telah dipanaskan pada suhu 60 - 80 °C selama 10 minit. Seterusnya, penambahan 200 mL air

ternyahion, 10 mL asid fosforik pekat ( $H_3PO_4$ ), 0.2 g natrium fluorida (NaF) dan 0.5 mL penunjuk difenil telah ditambah kepada sampel sebagai penunjuk karbon organik. Akhir sekali, pentitrat 0.5 N ammonium ferus sulfat ( $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) telah dititrat dengan sampel sehingga kelihatan hijau lumut.

Bagi analisis kandungan  $^{210}Pb$  dalam kedua-dua teras, kaedah yang telah dijelaskan oleh Mohamad Arif et al. (2021) dan Yusoff et al. (2017) telah diguna pakai dalam uji kaji ini. Kira-kira 300 mg sampel kering dan homogen dicernakan dalam bikar Teflon dengan gabungan 10 mL  $HNO_3$  + 3 mL  $H_2O_2$  + 2 mL HF selama 2 jam sehingga hampir kering dicapai. Seterusnya, kira-kira 2 mL 0.5 M  $HNO_3$  dan 0.5 g asid borik telah ditambah ke dalam sampel dan dipanaskan semula untuk peneutralan ion fluorida. Ia kemudiannya dicairkan dengan 50 mL air ternyahion.

Fasa cecair yang diperoleh telah diempar selama 3 minit pada 4500 rpm selepas dirawat dengan gabungan larutan  $FeCl_3$  dan ammonia. Untuk pengasingan, proses

pengenapan elektro telah dijalankan pada julat voltan 2.2 – 2.5 selama 45 minit menggunakan kasa platinum sebagai sambungan negatif dan rod keluli untuk sambungan positif. Plumbum (II) yang diperoleh dibilas dengan 3M asid nitrik dan 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan dipanaskan pada suhu yang rendah bagi mengeluarkan cecair yang berlebihan. Kemudian, sampel dicampur dengan 0.5 M HNO<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan dibiarkan semalaman untuk hablur PbSO<sub>4</sub>. Kertas penapis 0.45 µm digunakan untuk mengumpul hablur PbSO<sub>4</sub> dan sedia untuk dihitung selepas 25 hari pengenapan elektro dengan pembilang-β dengan menggunakan perisian Eclipse daripada Canberra®. Bagi penilaian tahap kecekapan kaedah, bahan rujukan piawai (SRM) DH-1a telah digunakan bagi jaminan kualiti dan dianalisis dengan prosedur yang sama seperti sampel dan memperoleh aktiviti <sup>210</sup>Pb berjulat dalam nilai yang diperakui pada 30800 ± 900 Bq/kg, dengan perolehan semula pada kira-kira 94 % untuk jumlah 5 replikat.

Secara asasnya, pengiraan kadar sedimentasi bagi model CIC dalam sedimen menggunakan persamaan oleh Mahmood et al. (2010);

$$A_x = A_o e^{-\lambda(\frac{x}{s})} \quad (1)$$

$$s = -\lambda a \quad (2)$$

dengan  $A_x$  adalah aktiviti <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> di antara permukaan sedimen dan air;  $A_o$  ialah aktiviti <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> di permukaan;  $\lambda$  pemalar reputan bagi radionuklid <sup>210</sup>Pb (0.03108/thn);  $s$  merupakan kadar sedimentasi dan  $a$  ialah kecerunan garisan yang diperoleh daripada analisis regresi bagi  $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$  dengan profil kedalaman. Manakala, bagi kadar sedimentasi untuk model CRS yang diambil dari Mahmood et al. (2010) adalah;

$$A_x = A_o e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$t = x/s \quad (4)$$

$$s = \lambda x / [\ln(A_{co}/A_{cx})] \quad (5)$$

dengan  $A_{cx}$  adalah aktiviti kumulatif <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> pada kedalaman  $x$ ;  $A_{co}$  ialah purata aktiviti <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> di bawah zon penurunan eksponen;  $s$  merupakan kadar pemendapan,  $x$  merupakan kedalaman sedimen (cm);  $t$  ialah umur sedimen; dan  $\lambda$  pemalar reputan bagi radionuklid <sup>210</sup>Pb (0.03108/thn).

Bagi menganggarkan kadar perubahan dan akumulasi berlaku dalam teras sedimen, pengiraan inventori telah digunakan. Tambahan pula, kehadiran faktor hidrologi yang mempengaruhi teras sedimen akan membawa kepada perubahan kadar pengumpulan. Oleh itu, persamaan daripada Mahmood et al. (2010) untuk menilai inventori mengikut <sup>210</sup>Pb digunakan;

$$I = \frac{p \cdot s \cdot A_I}{\lambda} \quad (6)$$

dengan  $I$  merupakan inventori radionuklid di dalam teras sedimen (Bq cm<sup>-2</sup>);  $A_I$  adalah aktiviti radionuklid di permukaan;  $p$  merupakan ketumpatan sedimen yang diperoleh melalui kajian ini (2.75 gcm<sup>-3</sup>);  $s$  adalah kadar sedimentasi (cm thn<sup>-1</sup>); dan  $\lambda$  pemalar reputan bagi radionuklid <sup>210</sup>Pb (0.03108/thn). Sementara itu, bagi menganggarkan fluks daripada inventori, formula daripada (Mahmood et al. 2010) diguna pakai;

$$F = \lambda I \quad (7)$$

dengan  $F$  merupakan fluks tahunan (Bq m<sup>-2</sup> thn<sup>-1</sup>);  $\lambda$  pemalar reputan bagi radionuklid <sup>210</sup>Pb (0.03108/thn) dan  $I$  adalah inventori daripada formula sebelum ini.

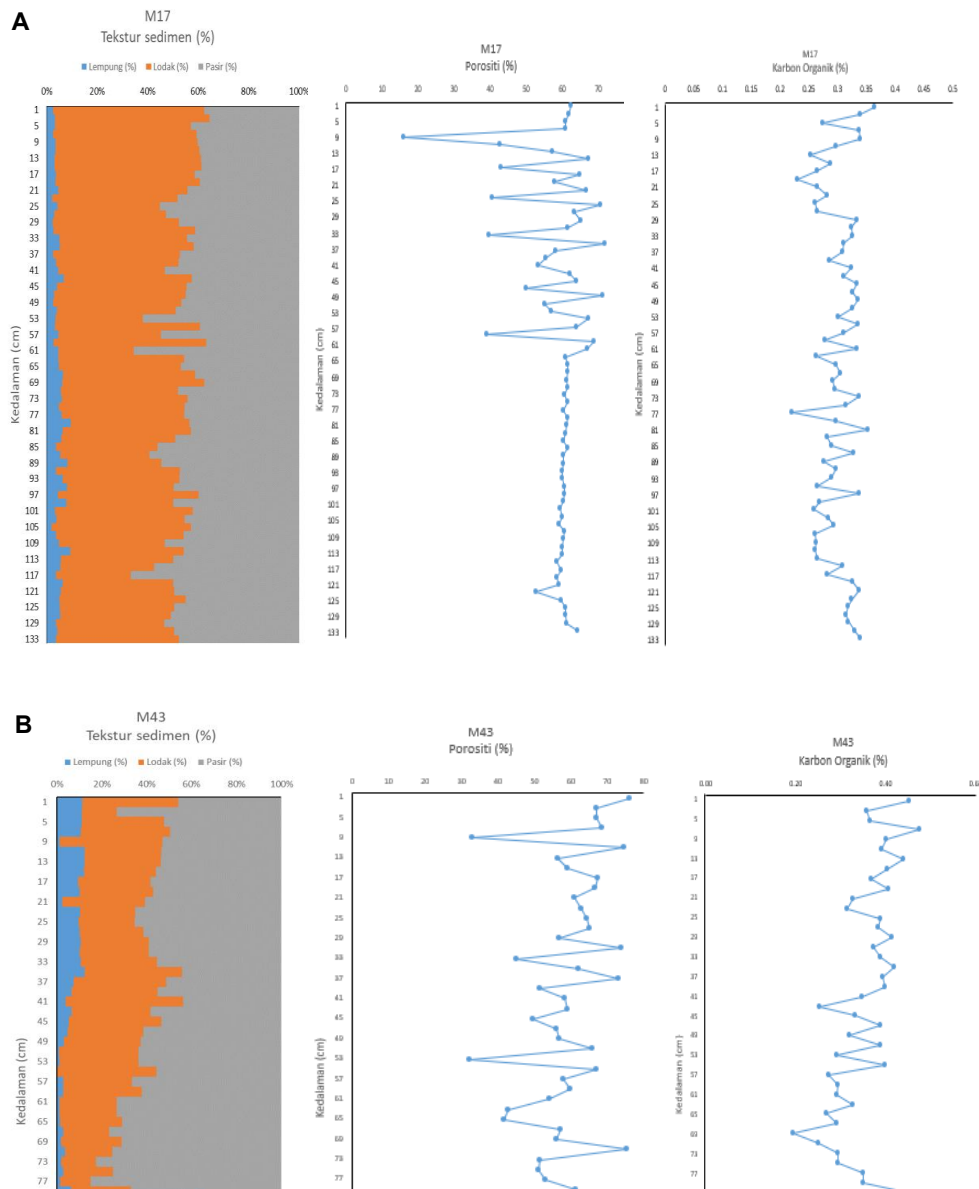
## KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

### CIRI FIZIKAL SEDIMEN

Sedimen yang diperoleh dari Selat Melaka dan Lembangan Melayu menunjukkan peratusan yang rendah untuk Lembangan Melayu berbanding Selat Melaka dan wujudnya perbezaan kecil yang terdapat dalam nilai purata keliangan dan kandungan karbon organik. Terdapat perbezaan ketara dalam pecahan saiz butiran purata antara kedua-dua stesen dan terdapat perbezaan 40.3% dalam lempung, 19% dalam kelodak dan 12% dalam pasir. Kandungan kelodak lebih tinggi di stesen M17 berbanding stesen M43 yang menunjukkan pengaruh angkutan Ekman di luar pantai Vietnam. Catatan dari Tang et al. (2006) menunjukkan bahawa pergerakan Chl-a yang bergabung bersama hasil pengeluaran sedimen melalui Sungai Mekong sangat dipengaruhi oleh angkutan Ekman di sepanjang pesisir pantai Vietnam, mengakibatkan pergerakan hamparan fitoplankton dan sedimen bersaiz halus mengikuti arus aliran air yang dikawal oleh musim monsun. Selain itu, pusat gempa siklon dan antisiklonik sebagai daya penggerak utama di sekeliling stesen pensampelan

mengakibatkan penggantungan semula dan pemendapan semula ke sedimen dasar laut (Daryabor, Tangang & Juneng 2014). Sebaliknya, peratusan lempung dan pasir yang tinggi di M43 menunjukkan input utama bahan terampai mudah alih dari selatan ke arah utara Selat Melaka, menjejaskan bilangan peratusan lempung dan pasir di Selat Melaka. Menurut Rizal et al. (2012), Selat Melaka berada di bawah pengaruh monsun bermusim yang aktif mengangkut bahan terampai di sepanjang selat,

manakala bahagian utara Selat Melaka dikategorikan sebagai separa harian pasang surut bercampur akibat kemasukan pinggir pelantar, mengakibatkan kandungan tinggi lempung dan pasir di kawasan pantai. Selain itu, menurut Mandal et al. (2021), arus pergerakan yang dipengaruhi oleh monsun di Selat Melaka turut dikesan melalui taburan klorofil-a yang mana turut berkait rapat dengan angkutan jisim Ekman, suhu permukaan air dan daya keikalan.



RAJAH 2. Taburan menegak ciri-ciri sedimen di stesen M17 (A) and M43 (B)

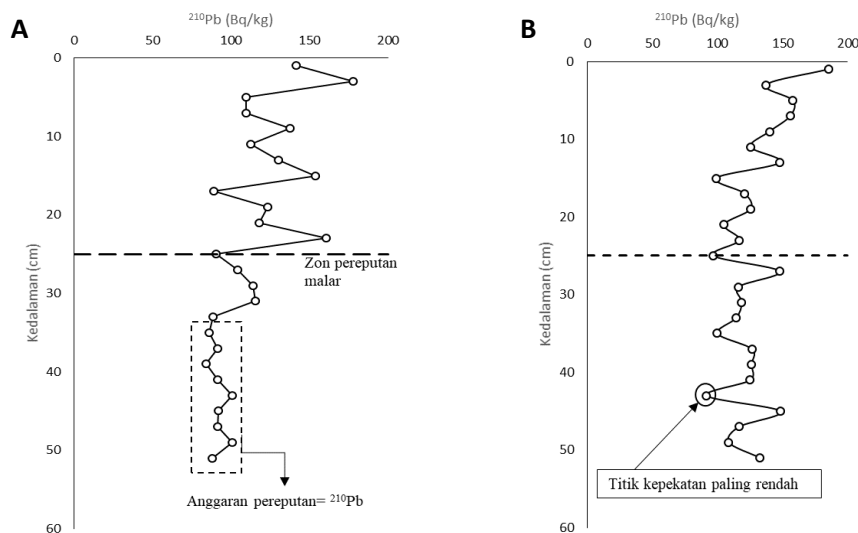
PROFIL MENEGAK  $^{210}\text{Pb}$  DAN UNSUR GEOKIMIA

Rajah 2 menunjukkan profil menegak yang terdapat di Selat Melaka dan lembangan Melayu di perairan pantai. Perbezaan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  bagi setiap stesen adalah pada 10%, menandakan perbezaan input sedimen yang membekalkan  $^{210}\text{Pb}$  di kedua-dua kawasan perairan. Melalui pemerhatian daripada data direkodkan teras menegak, perbezaan ketara juga ditemui pada profil menegak kedua-dua stesen sehingga 25 cm pada lapisan bawah menunjukkan proses pereputan sebelumnya yang ketara serta pendedahan pada proses bioturbasi. Dalam M17, pemalar pereputan direkodkan dalam Rajah 2(A) yang berlalu selepas kedalaman 25 cm, menandakan pereputan  $^{210}\text{Pb}$  bersama-sama dengan  $^{210}\text{Pb}$  yang disokong dalam teras sedimen menegak (Pittauerová, Hettwig & Fischer 2011). Sebaliknya, pendekatan pengiraan dengan menggunakan titik tunggal melebihi 25 cm (Rajah 2(B)) di stesen M43 telah diguna pakai, kerana teras menegak tertakluk kepada pencampuran semula yang berterusan disebabkan oleh faktor hidrologi atau buatan (Florea et al. 2011).

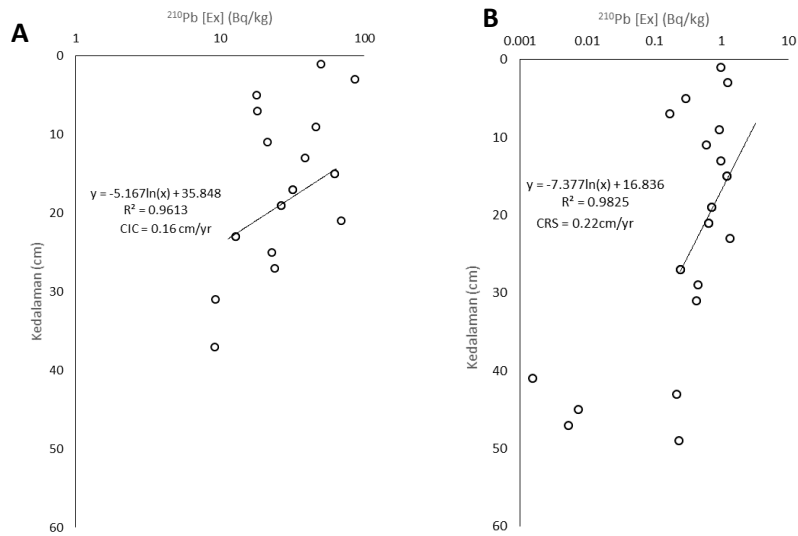
Terdapat beberapa faktor yang boleh dijelaskan dalam teras menegak M17 dan M43 daripada perenggan sebelumnya (Rajah 3). Di Selat Melaka, pengumpulan  $^{210}\text{Pb}$  di dalam pintu masuk selat sebagai kipas fluvial dan titik tercekik untuk paras selat yang lebih rendah, mengakibatkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  yang tinggi berbanding pesisir laut luas di Lembangan Melayu (Sathiamurthy & Rahman 2017). Profil menunjukkan aktiviti teras yang

bukan linear bagi  $^{210}\text{Pb}$  dengan peningkatan kedalaman di semua stesen pensampelan (Rajah 4 & 5). Tambahan pula, aktiviti yang diperoleh menunjukkan corak biasa pereputan dalam teras sedimen, menandakan proses fizikal dan biologi dalam teras sedimen. Perbezaan pecahan saiz butiran berkenaan dengan aktiviti menegak  $^{210}\text{Pb}$  akan mencadangkan perbezaan trajektori arus air laut yang terdapat di Lembangan Melayu dan Selat Melaka. Menurut Liu et al. (2011), laluan air Lembangan Melayu dan Selat Melaka adalah berbeza dengan jet pantai yang terdapat di Lembangan Melayu adalah baki arus membujur pesisir Vietnam dan pencerobohan arus Kuroshio. Sementara itu, laluan untuk Selat Melaka adalah dari Laut Andaman ke arah Selat Melaka melalui paksaan arus Lautan Hindi (Rizal et al. 2012).

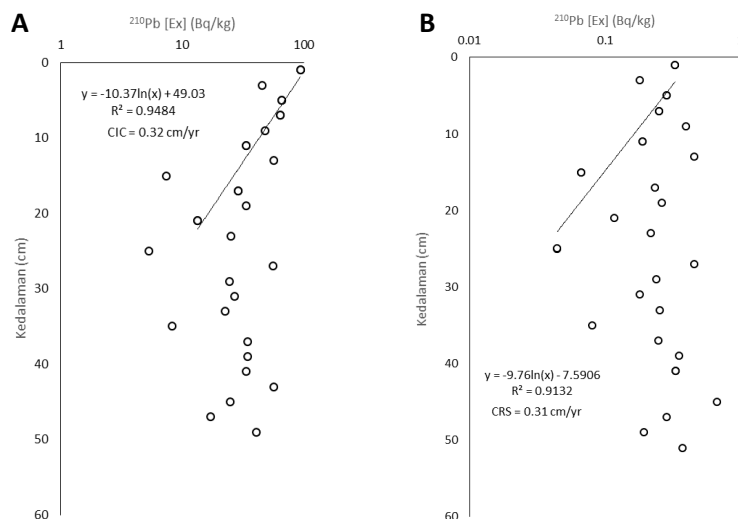
Secara amnya, aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  yang diperoleh adalah tinggi, memiliki input pelantar rentas daripada input lembangan saluran yang bertentangan atau melalui pereputan *in-situ*  $^{210}\text{Pb}$ . Tambahan pula, sistem monsun memainkan peranan penting dalam mengekalkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  berubah-ubah dengan magnitud sistem monsun yang lebih tinggi mempercepatkan kadar luluhawa dan pergerakan semula melalui variasi arus air, sekali gus membawa kepada pergerakan semula bagi setiap sistem monsun (Staub, Among & Gastaldo 2000). Pengaruh saiz butiran turut merubah aktiviti *in-situ* kerana luas permukaan lempung serta kadar serapan yang lebih tinggi berbanding dengan pasir yang menyumbang kepada pembawa utama untuk pergerakan semula dan



RAJAH 3. Taburan menegak  $^{210}\text{Pb}$  di stesen M17 (A) and M43 (B)



RAJAH 4. Garisan linear antara kedalaman vs  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  teras M17 di bawah model CIC (A) garisan linear antara kedalaman vs  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  teras M17 di bawah model CRS (B)



RAJAH 5. Garisan linear antara kedalaman vs  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  teras M43 di bawah model CIC (A) garisan linear antara kedalaman vs  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  teras M43 di bawah model CRS (B)

pemendapan di sepanjang pesisir pantai (Hassellöv et al. 2001). Menurut Wang et al. (2020), corak angkutan yang berbeza ketika musim monsun di sepanjang Pantai Chanthaburi yang terletak di Teluk Thailand mengakibatkan kandungan sedimen yang terdiri daripada lempung, lodak dan pasir berubah-ubah di kawasan perairan Teluk Thailand. Secara tidak langsung, wujud

kepelbagaian dalam pengisihan sedimen pada setiap kehadiran musim monsun, yang jelas dilihat pada teras sedimen. Kadar penyerapan yang lebih tinggi berserta gabungan dengan luas permukaan lempung yang lebih besar akan diterjemahkan kepada variasi dalam aktiviti logam surih dan kadar mobilisasi yang mengakibatkan petunjuk kehadiran bioturbasi atau pemineralan semula

dalam kawasan kajian sekali gus merubah akumulasi dan aktiviti sedimen (Heiden & Holmes 1998). Menurut Aller dan Cochran (2019), bioturbasi yang hadir di sekitar perairan Amerika Utara mengakibatkan pemineralan semula di sepanjang kawasan perairan dan secara tidak langsung menghasilkan peningkatan pemendapan bahan biologi labil di dalam lapisan sedimen.

Dalam analisis statistik, kandungan lempung yang terdapat di dalam kedua-dua teras sedimen menerima hubungan negatif terhadap kelodak ( $r = -0.695$ ,  $p < 0.01$ ), manakala mempunyai hubungan positif terhadap pasir ( $r = 0.451$ ,  $p < 0.01$ ) yang menandakan proses bioturbasi di bawah musim monsun tinggi yang membawa kepada

jumlah pengagihan semula dan pemineralan semula dalam radius stesen persampelan. Perkara ini turut disokong oleh Aller dan Blair (2004) dengan kadar pemineralan semula yang tinggi akibat kehadiran monsun turut menyebabkan kesan kitaran semula berlaku pada bahan organik yang terkandung di dalam sedimen. Tahap kebolehtelapan yang tinggi akibat sentuhan fizikal yang dijana oleh sistem monsun mungkin membawa kepada mendapan sedimen yang lebih longgar kerana kekurangan daya lekitan ke atas sedimen di kedua-dua stesen, sekali gus mengurangkan pecahan tanah liat dalam sedimen berasaskan pasir (Ahmerkamp et al. 2020; Cuthbertson et al. 2016).

JADUAL 1. Korelasi antara pemboleh ubah yang wujud di dalam teras sedimen di Tanah Sunda

|                   | Lempung | Kelodak | Pasir   | TOC     | $^{210}\text{Pb}$ | Fluks   | Inventori |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------|---------|-----------|
| Lempung           | 1       |         |         |         |                   |         |           |
| Kelodak           | -.695** | 1       |         |         |                   |         |           |
| Pasir             | .451**  | -.955** | 1       |         |                   |         |           |
| TOC               | .620**  | -.488** | .350*   | 1       |                   |         |           |
| $^{210}\text{Pb}$ | -.491** | .763**  | -.744** | -.391** | 1                 |         |           |
| Fluks             | .554**  | -.517** | .413**  | .689**  | -0.234            | 1       |           |
| Inventori         | -.583** | .775**  | -.722** | -.552** | .857**            | -.573** | 1         |

\* Korelasi adalah signifikan pada aras 0.05 (2 hujung), \*\* Korelasi adalah signifikan pada aras 0.01 (2 hujung), N=52

Kehadiran pecahan lempung dalam sedimen turut mempengaruhi kandungan karbon organik (TOC) yang terdapat dalam sedimen ( $r = 0.620$ ,  $p < 0.01$ ), kerana sedimen bersaiz halus penyumbang utama kepada pembawa untuk mobilisasi dan pelepasan daripada sedimen termendap (Wang et al. 2017). Kejadian yang sama disebabkan oleh magnitud monsun yang dihasilkan pada kelodak, menghasilkan hubungan negatif ( $r = -0.488$ ,  $p < 0.01$ ), mencadangkan penyingkiran karbon organik melalui faktor hidrologi, dipengaruhi oleh musim monsun. Penyataan ini turut disokong oleh Zhang et al. (2019) kerana faktor hidrologi yang dipengaruhi monsun menjadi punca utama dalam penyingkiran karbon organik di sepanjang sungai Changhuajiang dan lantas dialir keluar ke Laut Cina Selatan. Dalam aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  pada kedua-dua teras, tekstur sedimen memainkan peranan penting untuk pengagihan

$^{210}\text{Pb}$  dalam teras sedimen. Hubungan negatif pasir dan tanah liat berkenaan dengan  $^{210}\text{Pb}$  menunjukkan magnitud tinggi musim monsun yang menjana pergerakan hidrologi berterusan yang membawa kepada penyingkiran  $^{210}\text{Pb}$  tak organik dalam sedimen yang terendap (Wei et al. 2014)  $18^{\circ}00' \text{ N}$  and  $116^{\circ}00' \text{ E}$ . Di samping itu, pecahan pasir yang tinggi yang terdapat dalam sedimen akan membawa kepada kesan pencairan  $^{210}\text{Pb}$ , menghasilkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  yang lebih rendah dalam pecahan pasir (Raygoza-Viera et al. 2014).

Sementara itu, sumbangan freksi lempung sebagai pembawa untuk radionuklid boleh membawa kepada aras aktiviti yang tinggi kerana hubungan positif kelodak mencadangkan pemendapan  $^{210}\text{Pb}$  ke atas kelodak boleh meningkatkan tahap aktiviti. Memandangkan kawasan persampelan dipengaruhi oleh sistem monsun, variasi tekstur sedimen bertindak sebagai pembawa dan



pengebumian terjejas oleh magnitud musim monsun, berikutan hubungan yang wujud antara tekstur sedimen (Szczuciński, Statterger & Scholten 2009). Sentuhan fizikal tekstur sedimen yang bertepatan dengan musim monsoon akan mengubah sifat fizikal sedimen pukal, yang kemudiannya menjejaskan persekitaran pemendapan teras sedimen. Menurut Kulkarni, Deshbhandari dan Jayappa (2015), pengasingan sedimen pada musim monsun berserta dengan batimetri yang berbeza akan menimbulkan persekitaran pemendapan yang berbeza kerana persekitaran marin yang lebih cetek mengganggu keadaan pencampuran berbanding dengan persekitaran marin yang lebih dalam disebabkan oleh perbezaan dalam manifestasi tenaga gelombang dan pergerakan arus, sekali gus menjejaskan corak sedimen, fluks dan inventori di kedua-dua stesen persampelan.

Melihat fluks dan inventori yang diperoleh, hubungan korelasi kedua-duanya yang signifikan dengan tekstur sedimen akan mewakili sifat sedimen yang mempengaruhi  $^{210}\text{Pb}$  dalam pengangkutan sedimen ke persekitaran pemendapan. Dalam masa yang sama, perbincangan oleh Mabit, Benmansour dan Walling (2008) mendedahkan bahawa tahap hakisan yang tinggi yang terdapat di pantai boleh menjadi penyumbang utama kepada penurunan tahap aktiviti  $^{210}\text{Pb}$ , bersama-sama dengan perbezaan dalam sifat fizikal sedimen yang menjadi perumah  $^{210}\text{Pb}$ . Tambahan pula, pencerobohan dan penghijrahan koloid sebagai pembawa sub-media untuk  $^{210}\text{Pb}$  dalam sedimen berliang, sekali gus meningkatkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam sedimen (Seo, Joung & Kim 2021). Menurut Merdy et al. (2021) melalui fasa terlarut dengan potensi penyimpanan oleh mineral lempung adalah besar kerana kandungan lempung mempengaruhi mobiliti dan kapasiti penyerapan menyebabkan kebarangkalian tinggi pengagihan semula dalam teras menegak. Apabila berlakunya percampuran disebabkan oleh sistem monsun, seterusnya akan mempengaruhi jumlah aktiviti radionuklid yang terdapat dalam sedimen. Kajian oleh Mabit et al. (2014) membentangkan kebolehubahan temporal yang tinggi disebabkan oleh dominan pergerakan jisim udara di atmosfera, seterusnya mempengaruhi magnitud pergerakan arus dan gelombang di pantai berikutan pengangkutan sedimen yang kemudiannya diterjemahkan kepada aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  yang dipengaruhi oleh musim monsun.

#### KADAR SEDIMENTASI DAN UMUR SEDIMEN

Pada dasarnya, dua model matematik yang berbeza (CIC dan CRS) telah digunakan untuk menganggar kadar sedimentasi dalam profil menegak. Khususnya, pentarikhan  $^{210}\text{Pb}$  menggunakan model CIC sesuai untuk persekitaran sedimen yang stabil seperti, tasik, paya masin

dan lombong manakala CRS sesuai untuk persekitaran sedimen yang kurang stabil (Iurian et al. 2021; Mahmood et al. 2010). Dalam bahagian ini, memandangkan terdapat perbezaan jumlah  $^{210}\text{Pb}$  di kedua-dua stesen mengikut keadaan dan lokasi yang berbeza, maka pengiraan dengan mengambil faktor proses pereputan dan bioturbasi masing-masing di kedua-dua stesen. Kadar sedimentasi untuk CIC di kedua-dua stesen ialah 0.16 cm/th dan 0.32 cm/th, masing-masing untuk stesen M17 dan M43. Sementara itu, kadar sedimentasi yang diperoleh untuk CRS ialah 0.22 cm/th dan 0.31 cm/th, masing-masing untuk M17 dan M43. Model CRS boleh digunakan secara meluas untuk aplikasi praktikal berikutan kehadiran hidrologi yang mengakibatkan perubahan berterusan dalam pemendapan dan pengumpulan sedimen (Blais et al. 1995). Tahap perbezaan 17% di bawah model CRS antara kedua-dua stesen (M17 dan M43) menunjukkan variasi ruang dan temporal di bawah magnitud yang lebih tinggi akan menyebabkan pemendapan berterusan di kawasan pantai.

Oleh kerana Tanah Sunda terletak di sepanjang garisan Khatulistiwa, ia menerima monsun tahunan yang membawa kepada perubahan ruang dan masa, mengakibatkan perubahan sifat-sifat sedimen di pantai. Menurut Tangang et al. (2011), musim monsun memainkan peranan penting untuk pengangkutan sedimen yang berterusan dengan pengalir atasan dan pengalir bawahan terhasil bersama-sama gir siklon dan anti-siklonik, menghasilkan persekitaran pengagihan semula di sekitar Lembangan Melayu. Sebaliknya, paras jumlah hujan yang tinggi direkodkan oleh Kok et al. (2017) dengan punca pelepasan sedimen diperoleh oleh Sungai Irrawaddy dan digerakkan oleh musim monsun di sepanjang Teluk Martaban dan Andaman Laut, membawa kepada akumulasi di Selat Melaka. Tambahan pula, arus dan pasang surut yang dihasilkan di Lembangan Melaka adalah separa diurnal di bawah pentas pesisir yang membawa kepada bekalan sedimen yang berterusan dari pentas lautan bersebelahan (Rizal et al. 2012). Perbandingan kadar sedimentasi CRS adalah lebih tinggi di Lembangan Melayu dan Selat Melaka berbanding dengan kawasan lautan lepas lain yang mengelilingi Tanah Sunda. Menurut Mahmood et al. (2011), purata CIC dan CRS di pantai Sarawak ialah 0.40 sm/th dan 0.31 sm/th manakala di pantai Sabah masing-masing ialah 0.39 sm/th dan 0.25 sm/th. Bentuk muka bumi cetek, kurang bekalan daratan dan perbezaan input arus air di kawasan lembangan separa terbuka berbanding jenis lembangan terus masuk Selat Melaka dan lembangan separa terbuka bagi Tanah Sunda mempengaruhi pemendapan mengakibatkan perbezaan dari sudut kadar sedimentasi yang besar antara Pulau Borneo (Sabah dan Sarawak) dan Tanah Sunda (Ismail et al. 1995; Tongkul 1991).

JADUAL 2. Pengiraan umur teras sedimen di Tanah Sunda

| Stesen M17     |                                    |       |                                    |       | Stesen M43     |                                    |       |                                    |       |
|----------------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|----------------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| Kedalaman (cm) | Kadar pemendapan CRS (0.22 cm/thn) | Tahun | Kadar pemendapan CIC (0.16 cm/thn) | Tahun | Kedalaman (cm) | Kadar pemendapan CRS (0.31 cm/thn) | Tahun | Kadar pemendapan CIC (0.32 cm/thn) | Tahun |
| 0-2            | 4.55                               | 2012  | 6.25                               | 2011  | 0-2            | 3.2                                | 2014  | 3.1                                | 2014  |
| 2-4            | 13.64                              | 2003  | 18.75                              | 1998  | 2-4            | 9.7                                | 2007  | 9.4                                | 2008  |
| 4-6            | 22.73                              | 1994  | 31.25                              | 1986  | 4-6            | 16.1                               | 2001  | 15.6                               | 2001  |
| 6-8            | 31.82                              | 1985  | 43.75                              | 1973  | 6-8            | 22.6                               | 1994  | 21.9                               | 1995  |
| 8-10           | 40.91                              | 1976  | 56.25                              | 1961  | 8-10           | 29.0                               | 1988  | 28.1                               | 1989  |
| 10-12          | 50.00                              | 1967  | 68.75                              | 1948  | 10-12          | 35.5                               | 1982  | 34.4                               | 1983  |
| 12-14          | 59.09                              | 1958  | 81.25                              | 1936  | 12-14          | 41.9                               | 1975  | 40.6                               | 1976  |
| 14-16          | 68.18                              | 1949  | 93.75                              | 1923  | 14-16          | 48.4                               | 1969  | 46.9                               | 1970  |
| 16-18          | 77.27                              | 1940  | 106.25                             | 1911  | 16-18          | 54.8                               | 1962  | 53.1                               | 1964  |
| 18-20          | 86.36                              | 1931  | 118.75                             | 1898  | 18-20          | 61.3                               | 1956  | 59.4                               | 1958  |
| 20-22          | 95.45                              | 1922  | 131.25                             | 1886  | 20-22          | 67.7                               | 1949  | 65.6                               | 1951  |
| 22-24          | 104.55                             | 1912  | 143.75                             | 1873  | 22-24          | 74.2                               | 1943  | 71.9                               | 1945  |
| 24-26          | 113.64                             | 1903  | 156.25                             | 1861  | 24-26          | 80.6                               | 1936  | 78.1                               | 1939  |
| 26-28          | 122.73                             | 1894  | 168.75                             | 1848  | 26-28          | 87.1                               | 1930  | 84.4                               | 1933  |
| 28-30          | 131.82                             | 1885  | 181.25                             | 1836  | 28-30          | 93.5                               | 1923  | 90.6                               | 1926  |
| 30-32          | 140.91                             | 1876  | 193.75                             | 1823  | 30-32          | 100.0                              | 1917  | 96.9                               | 1920  |
| 32-34          | 150.00                             | 1867  | 206.25                             | 1811  | 32-34          | 106.5                              | 1911  | 103.1                              | 1914  |
| 34-36          | 159.09                             | 1858  | 218.75                             | 1798  | 34-36          | 112.9                              | 1904  | 109.4                              | 1908  |
| 36-38          | 168.18                             | 1849  | 231.25                             | 1786  | 36-38          | 119.4                              | 1898  | 115.6                              | 1901  |
| 38-40          | 177.27                             | 1840  | 243.75                             | 1773  | 38-40          | 125.8                              | 1891  | 121.9                              | 1895  |
| 40-42          | 186.36                             | 1831  | 256.25                             | 1761  | 40-42          | 132.3                              | 1885  | 128.1                              | 1889  |
| 42-44          | 195.45                             | 1822  | 268.75                             | 1748  | 42-44          | 138.7                              | 1878  | 134.4                              | 1883  |
| 44-46          | 204.55                             | 1812  | 281.25                             | 1736  | 44-46          | 145.2                              | 1872  | 140.6                              | 1876  |
| 46-48          | 213.64                             | 1803  | 293.75                             | 1723  | 46-48          | 151.6                              | 1865  | 146.9                              | 1870  |
| 48-50          | 222.73                             | 1794  | 306.25                             | 1711  | 48-50          | 158.1                              | 1859  | 153.1                              | 1864  |
| 50-52          | 231.82                             | 1785  | 318.75                             | 1698  | 50-52          | 164.5                              | 1852  | 159.4                              | 1858  |

Melalui model CRS, perbezaan kedua-dua teras sedimen dapat dilihat di bawah pengaruh ciri fizikal sedimen. Memandangkan terdapat perkaitan yang terdapat dalam  $^{210}\text{Pb}$  berkenaan dengan tekstur sedimen (lempung, pasir dan kelodak) dalam Jadual 1, ia menunjukkan bahawa saiz butiran mempengaruhi  $^{210}\text{Pb}$  yang terdapat dalam sempadan teras sedimen, kerana ia mungkin dipengaruhi oleh pengedaran ruang dan temporal dengan sumber utama adalah melalui sumber atmosfera dan detrital yang dialirkan melalui lembangan saluran. Untuk mengenal pasti hubungan antara saiz butiran dengan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dengan lebih lanjut, analisis

korelasi telah dijalankan untuk menyokong hipotesis. Jadual 3 mewakili keputusan hubungan antara  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dan saiz zarah. Sama seperti jumlah taburan menegak  $^{210}\text{Pb}$  (Rajah 2), terdapat hubungan dengan sedimen tekstur, dengan hubungan positif antara  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dan pecahan kelodak ( $r = 0.605$ ,  $p < 0.01$ ) manakala hubungan negatif adalah tanah liat ( $r = -0.404$ ,  $p < 0.05$ ) dan pecahan pasir ( $r = -0.544$ ,  $p < 0.05$ ) terhadap  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dalam teras sedimen menegak. Pemerhatian daripada Jadual 3 mendapati bahawa  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  tidak semata-mata dikawal oleh kelodak, sebaliknya tertakluk kepada penyingkiran lempung bersama-sama dengan daya peresapan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dalam pasir dalam sedimen dasar laut.

JADUAL 3. Pemboleh ubah korelasi  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  teras sedimen di Tanah Sunda

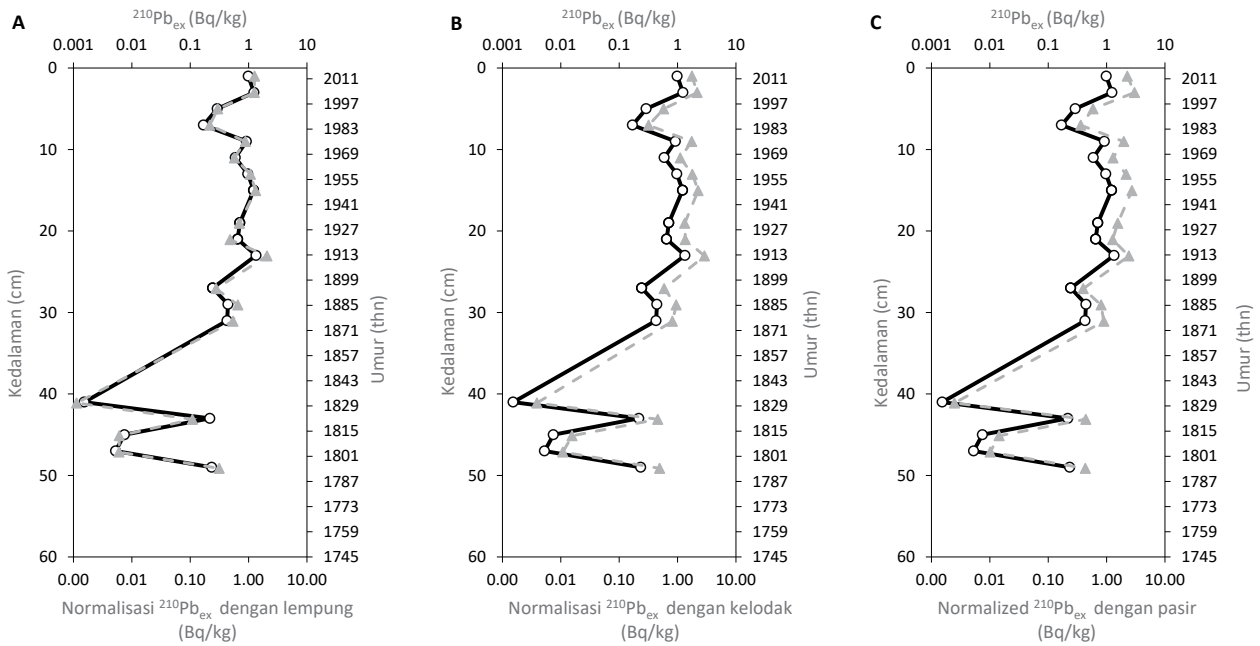
|                               | $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ | Lempung | Kelodak  | Pasir |
|-------------------------------|-------------------------------|---------|----------|-------|
| $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ | 1                             |         |          |       |
| Lempung                       | -0.404*                       | 1       |          |       |
| Kelodak                       | .605**                        | -0.274  | 1        |       |
| Pasir                         | -0.544**                      | 0.078   | -0.980** | 1     |

\* Korelasi adalah signifikan pada aras 0.05 (2 hujung), \*\* Korelasi adalah signifikan pada aras 0.01 (2 hujung), a. Mengikut senarai N=26

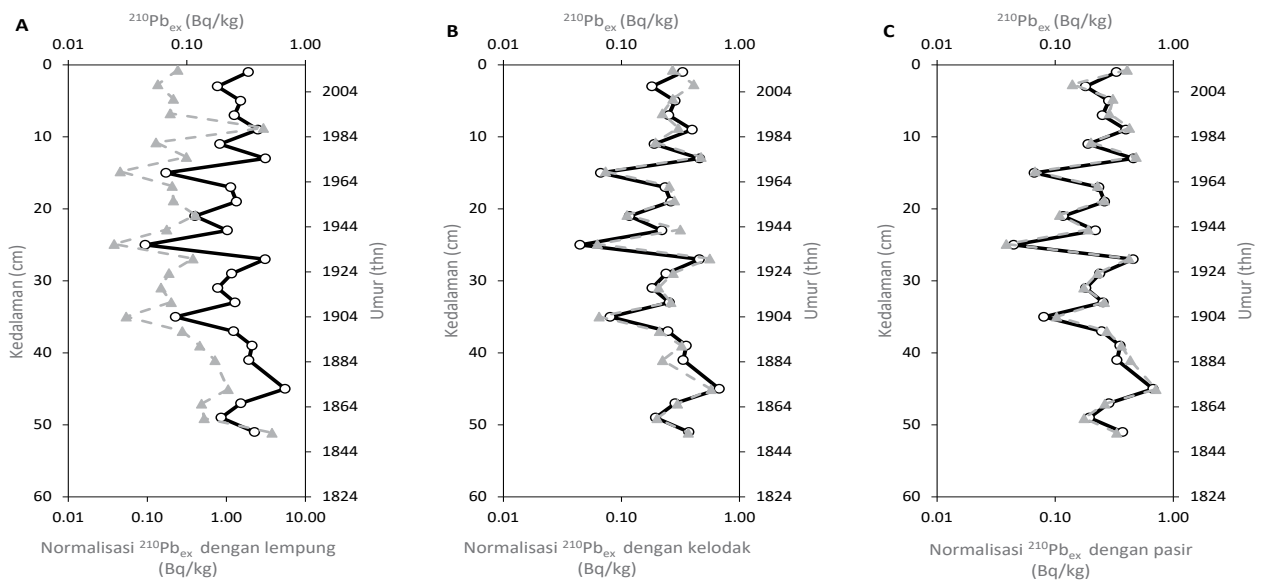
Untuk menilai mekanisme timbal-balik kesan saiz butiran terhadap  $^{210}\text{Pb}$  sebelum mentafsir proses pemendapan sebenar berdasarkan data  $^{210}\text{Pb}$ , dua prinsip utama akan didekati. Pertama, pemerolehan hubungan linear antara  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dan tekstur sedimen dan kedua menormalkan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dengan pecahan komponen individu dalam kajian ini untuk menilai corak yang melebihi aktiviti  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dengan kedalaman yang akan dibandingkan dengan data mentah dan data normalisasi. Ini disebabkan oleh fakta bahawa sumber dan proses tenggelam terdapat dalam persekitaran marin yang disebabkan oleh tekstur sedimen mempengaruhi prapemendapan dan selepas pemendapan  $^{210}\text{Pb}$  yang mempengaruhi taburan keseluruhan  $^{210}\text{Pb}$  dalam teras sedimen. Tambahan pula, daripada perbandingan antara data mentah dan normalisasi, beberapa peristiwa episodik boleh diberitahu daripada  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  yang diperolehi. Pada asasnya, selepas normalisasi, beberapa taburan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dipengaruhi oleh tekstur sedimen, menjadikannya lebih setanding daripada sebelumnya. Selain itu, tekstur sedimen yang dinormalisasi berkenaan dengan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dalam lapisan surfisial (0 cm hingga 26 cm) adalah berbeza antara kedua-dua teras. Ini mungkin dijelaskan

oleh perbezaan dalam sumber sedimen apabila M17 disumbangkan oleh kawasan selatan Laut China Selatan (sSCS) sebagai kolam utama untuk pemendapan sedimen yang terdiri daripada pelbagai sumber dari sekitar Asia Tenggara yang kebanyakannya berasal daripada paksaan iklim (Liu et al. 2012). Sementara itu, M43 menerima sumbernya dari tanah bersebelahan, yang diapit antara Semenanjung Malaysia dan Pulau Sumatera bersama penyumbang utamanya, Laut Andaman.

Daripada Rajah 6 dan 7, keseluruhan aliran turun naik lempung menjadi normal berbanding dengan tekstur sedimen yang lain menggambarkan faktor hidrologi dengan kehadiran magnitud monsun yang mempengaruhi taburan dan pengasingan sedimen dalam profil menegak. Tambahan pula, corak peningkatan dalam M17 berbanding corak berkurangan dalam M43 menunjukkan keberkesanan kesan granulometrik dan kebolehubahan dalam menilai taburan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  yang membawa kepada anggaran berlebihan dan anggaran rendah  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  (He & Walling 1996). Secara amnya, dalam lempung normalisasi  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , kurang pergerakan lempung sebagai pembawa dan mobilisasi yang menonjol terdapat dalam M17, mengikut arah aliran dalam Rajah



RAJAH 6. Plot aktiviti  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  mengikut kedalaman bagi data mentah dan data normalisasi dengan lempung (A); data mentah dan data normalisasi dengan kelodak (B); dan data mentah serta data normalisasi dengan pasir (C) di stesen M17



RAJAH 7. Plot aktiviti  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  mengikut kedalaman bagi data mentah dan data normalisasi dengan lempung (A); data mentah dan data normalisasi dengan kelodak (B); dan data mentah serta data normalisasi dengan pasir (C) di stesen M43

6(A). Memandangkan arus air Lembangan Melayu bersebelahan dengan kawasan Laut China Selatan (SCS), daya penggerak peredaran air bergantung terutamanya arah monsun yang bermusim, sebagai tindak balas menjana peredaran siklon dan peredaran anti-siklonik pada kedua-dua musim monsoon (Wang, Liu & Peng 2017). Oleh itu, pelepasan penyepaduan kedalaman yang lebih rendah bagi peredaran air berkenaan dengan umur (tahun) boleh menyebabkan daya penggerak lempung yang lebih rendah, tetapi sebaliknya mencampurkan semula dalam persekitaran kawasannya sendiri.

Sementara itu, corak hidrologi berlaku dalam freksi lempung M43 yang kemudiannya mempengaruhi aktiviti berkurangan sebelum pemendapan dalam profil menegak sedimen. Salur masuk air pasang yang mempengaruhi Selat Melaka berasal dari Laut Andaman apabila amplitud pasang surut dari Laut Andaman perlahan-lahan masuk ke dalam teluk Selat Melaka, menjadikan pergerakan air dalam stesen M43 menjadi lebih perlahan tetapi bergerak secara beransur-ansur ke bawah dan pergi ke Laut Jawa (Wyrski 1962). Air pasang monsun yang dijana setiap tahun di Selat Melaka menjana pergerakan ombak yang lebih tinggi mengelilingi stesen persampelan, yang seterusnya menghasilkan daya penggerak yang lebih tinggi untuk pergerakan semula sedimen dasar laut bersama-sama dengan pencampuran fizikal. Mobilisasi bersama-sama dengan pencampuran fizikal mampu mengubah rekod  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  selepas pemendapan apabila mekanisme bioturbasi di permukaan lapisan atas boleh membawa kepada keadaan pengoksidaan yang menggalakkan pada antara muka air dan sedimen (Peterson, Ankley & Leonard 1996).

Memandangkan kelodak dan pasir adalah asas untuk struktur sedimen dan pemendapan *in-situ*, bahagian ini akan menggabungkan kapasiti kelodak dan pasir sebagai struktur sedimen tunggal kerana kelodak dan pasir mampu menahan influx dan efluks unsur geokimia. Untuk kelodak normalisasi  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , terdapat peningkatan dalam aktiviti M17 di sepanjang teras sedimen menegak. Begitu juga, aktiviti tinggi  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  hadir dalam normalisasi pasir dan  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dalam teras menegak berbanding dengan data mentah (Rajah 6(C)). Arah aliran ini hadir dalam kedua-dua kelodak dan pasir yang mencadangkan kemasukan melalui daya penyerapan  $^{210}\text{Pb}$  melalui turus air bersama-sama dengan oksihidroksida hadir sebagai pemangkin untuk aktiviti  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  yang lebih tinggi dalam semua lapisan. Menurut Szabo, Stackelberg dan Cravotta (2020), keadaan pengurangan alkali sebagai penggalak utama yang terdapat dalam teras menegak akan menggalakkan pembubaran Fe-Mn oksihidroksida

dan sebagai tindak balas,  $^{210}\text{Pb}$  dinaikkan dalam lapisan sedimen. Memandangkan Lembangan Melayu terjejas oleh jumlah hujan tahunan, pemendapan basah  $^{210}\text{Pb}$  boleh meningkatkan lagi aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam lapisan sedimen sambil menindih aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  yang lalu. Perspektif kualitatif oleh Lozano et al. (2011) mendedahkan bahawa pengumpulan  $^{210}\text{Pb}$  bermusim sebelum ini dalam pemendapan atmosfera sebagai penyongsangan suhu antara muka udara-laut akan menghasilkan pembentukan radon dan projeni bersama-sama dengan pencampuran udara yang lebih tinggi ke arah pemendapan atmosfera (Baskaran 2011).

Walau bagaimanapun, perbezaan arah aliran  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  berkenaan dengan kedalaman dalam normalisasi kelodak di stesen M43 boleh dilihat dalam sedimen surfisial (<10 cm), kedalaman 23 cm, 27 cm, 41 cm dan 45 cm manakala tiada perbezaan ketara dalam normalisasi pasir. Daripada perbincangan sebelum ini, gerakan gelombang yang lebih tinggi mampu menjana daya penggerak yang lebih tinggi dalam mobilisasi semula bagi pecahan tanah liat, tetapi tiada perbezaan ketara dalam kelodak dan pasir yang menunjukkan penyumbang utama untuk  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dalam teras menegak mungkin penjanaan *in-situ* daripada  $^{226}\text{Ra}$ . Memandangkan kadar penyerapan *in-situ*  $^{210}\text{Pb}$  berlaku dalam sedimen dasar laut, bentuk koloid disesarkan dan atom radon terlarut di sepanjang lapisan menegak dalam sedimen (Prakash, Kaliprasad & Narayana 2018). Tambahan pula, lapisan bawah hampir mengekalkan atom  $^{226}\text{Ra}$  dalam lapisan disebabkan oleh tahap keliangan yang berbeza yang terdapat dalam teras sedimen menegak, menjadikan  $^{226}\text{Ra}$  mereput lebih jauh seterusnya, menjadikan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  sejajar dengan  $^{210}\text{Pb}$  mentah (Cook et al. 2018).

#### FLUKS SEDIMEN DAN INVENTORI

Kadar sedimentasi sedimen atau fluks ialah proses pemendapan yang disebabkan oleh ciri mekanikal bahan terampai di dalam air atau proses pembentukan dan terkumpul sedimen di dasar air. Hasil kajian ini menunjukkan bahawa kadar mendapan sedimen di setiap stesen penyelidikan lazimnya meningkat setiap tahun. Profil fluks sedimen berkenaan dengan kedalaman dipaparkan dalam Jadual 2. Purata fluks dan inventori untuk stesen M17 ( $18.89 \text{ Bq m}^{-2} \text{ thn}^{-1}$ ) adalah lebih tinggi berbanding M43 ( $16.54 \text{ Bq m}^{-2} \text{ thn}^{-1}$ ) dengan perbezaan 6% antara kedua-dua kawasan persampelan, M17 yang terdiri daripada Tanah Sunda menghadap sSCS manakala M43 menghadap Laut Andaman dan Teluk Martaban di Selat Melaka (Rajah 1). Inventori dan fluks yang tinggi yang terdapat dalam M17 menunjukkan

sumbangan lembangan saliran kerana penggarutan zarah mungkin memainkan peranan penting dalam pemendapan yang lebih besar dalam antara muka mendapan air dan sedimen (Mahmood et al. 2010). Namun begitu, nilai fluks dan inventori yang tinggi pada kedalaman selang (0-26 cm) pada kedua-dua teras mencadangkan proses air laut lintang yang dipengaruhi oleh musim monsun yang mengandungi  $^{210}\text{Pb}$  terlarut yang dihasilkan melalui penjana *in-situ* daripada  $^{226}\text{Ra}$  boleh membawa kepada pengayaan. Kebanyakan fluks zarah adalah dalam fasa

mudah alih melalui daya air lintang dengan magnitud yang lebih tinggi yang kemudiannya membekalkan kebanyakan sebatian organik (Masqué et al. 2002). Kajian terdahulu oleh Mahmood et al. (2010) mendedahkan bahawa penggarutan zarah melalui antara muka sedimen dan air bersama-sama dengan angkutan melalui arus air dengan pemangkin temporal kemudiannya akan membawa lebih banyak radionuklid terlarut, seterusnya menyumbang kepada tahap fluks dan inventori  $^{210}\text{Pb}$  yang tinggi dalam kedua-dua stesen persampelan.

JADUAL 4. Fluks dan inventori yang diperoleh di Tanah Sunda

| Stesen | Selang kedalaman (cm) | Fluks ( $\text{Bq m}^{-2} \text{thn}^{-1}$ ) | Inventori ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) |
|--------|-----------------------|--|----------------------------------|
| M17    | 0-26                  | 24.75  | 796.37                           |
|        | 26-52                 | 13.02  | 419.04                           |
| M43    | 0-26                  | 18.90  | 608.24                           |
|        | 26-52                 | 14.18  | 456.37                           |

Kehadiran musim monsun menjana daya fizikal yang menjejaskan sedimen dasar laut, mengakibatkan perbezaan sedimen terkumpul pada setiap musim. M17 dan M43 dipengaruhi oleh musim monsun dengan faktor hidrologi memainkan peranan yang besar dalam menentukan fluks dan inventori di sepanjang pantai Tanah Sunda. Menurut Kok et al. (2017), sumbangan musim monsun mungkin menjejaskan jisim air Tanah Sunda, di bawah kehadiran pasang surut dan gir mengakibatkan mobilisasi dan mengolah semula sedimen mengikut bermusim secara besar-besaran. Dari sudut statistik, terdapat hubungan positif fluks sedimen pada tanah liat ( $r = 0.55$ ,  $p = 0.00$ ) dan pasir ( $r = 0.413$ ,  $p = 0.002$ ) dalam sedimen tekstur. Hubung kait yang rapat lempung dengan fluks sedimen membayangkan perubahan tekstur sedimen perlahan-lahan mempengaruhi fluks keseluruhan (Rafiei & Kennedy 2019). Ini adalah kepentingan lempung sebagai pembawa untuk mobilisasi manakala pasir bertindak sebagai pereputan *in-situ* yang boleh memberikan akumulasi kecil  $^{210}\text{Pb}$  yang berada dalam sedimen.

Sebagai alternatif, hubungan positif antara kelodak sebagai pusat pemendapan utama untuk akumulasi dan inventori dalam sedimen mendedahkan keadaan akumulasi di kedua-dua stesen juga boleh mencerminkan pengeluaran primer yang lebih tinggi. Berbanding dengan

zarah litogenik iaitu lempung, proses penggarutan yang berkesan turut disumbangkan oleh bahan organik yang terdapat dalam sedimen (Yang et al. 2015).

Kajian oleh Schroeder, Wiesner dan Liu (2015) juga mendedahkan wujudnya pengalir atasan, didorong oleh kuasa hidrologi musim monsun yang terdapat di selatan Vietnam menjadikan sebagai proses yang berkesan dalam membekalkan  $^{210}\text{Pb}$  ke Lembangan Melayu bersama-sama dengan nutrien untuk menyokong pengeluaran utama. Tambahan pula, musim monsun yang akan datang daripada peralihan sebelumnya mungkin menyebabkan pencampuran menegak tahap tinggi, yang membawa kepada penggantungan semula dan pergerakan semula sedimen bersaiz halus (Nur Hidayah et al. 2015). Perubahan dalam fluks sedimen berikutan musim monsun adalah jelas apabila arus pesisir pantai mengerakkan sedimen terampai di sepanjang Pantai Vietnam dengan punca pemendapan sedimen adalah dari Sungai Mekong, mengakibatkan turun naik aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  (Chen et al. 2012). Sebaliknya, sumbangan Laut Andaman dan Teluk Martaban di bawah kuasa hidrologi mengikut musim monsun menyebabkan peningkatan  $^{210}\text{Pb}$  di sekitar Selat Melaka (Ramaswamy et al. 2004). Nilai fluks dan inventori yang rendah menunjukkan proses penyingkiran radionuklid dalam antara muka mendapan air yang tidak cekap (Mahmood et al. 2010). Persekitaran

mendapan yang terdapat di Selat Melaka dan Lembangan Melayu adalah kedalaman cetek dan kebolehubahan monsun yang terdapat di kedua-dua stesen, yang seterusnya membawa kepada perangkap  $^{210}\text{Pb}$  yang tidak berkesan untuk penyingkiran penggarutan di dasar antara muka sedimen dan air (Not et al. 2008).

#### KESIMPULAN

Di Tanah Sunda, perbezaan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di Lembangan Melayu dan Selat Melaka adalah disebabkan oleh musim monsun yang menyebabkan kuasa hidrologi menjadi penyumbang utama kepada turun naik kadar pemendapan. Hasil daripada inventori dan fluks juga menunjukkan kesan musim monsun ke atas tekstur sedimen sebagai pemendapan tunggal bahan organik dan bukan organik di perairan pantai.

#### PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada First Institute of Oceanography (FIO), Republik Rakyat China kerana menyediakan geran penyelidikan (ST-2016-005) melalui Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). Terima kasih juga kepada Kementerian Sains Teknologi & Inovasi (MOSTI) Malaysia dan Universiti Malaysia Terengganu dan Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan semasa persampelan. Akhir sekali, terima kasih kepada ahli makmal kerana menjadi kumpulan penyelidik yang cemerlang dan juga kepada kakitangan Jabatan Sains Bumi & Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia kerana membantu semasa persampelan.

#### RUJUKAN

- Ahmerkamp, S., Marchant, H.K., Peng, C., Probandt, D., Littmann, S., Kuypers, M.M.M. & Holtappels, M. 2020. The effect of sediment grain properties and porewater flow on microbial abundance and respiration in permeable sediments. *Scientific Reports* 10(1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60557-7>
- Aller, R.C. & Blair, N.E. 2004. Early diagenetic remineralization of sedimentary organic C in the gulf of Papua Deltaic Complex (Papua New Guinea): Net loss of terrestrial C and diagenetic fractionation of C isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68(8): 1815-1825. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.028>.
- Aller, R.C. & Cochran, J.K. 2019. The critical role of bioturbation for particle dynamics, priming potential, and organic C remineralization in marine sediments: Local and basin scales. *Frontiers in Earth Science* 7(June): 1-14. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00157>
- Baskaran, M. 2011. Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: A review. *Journal of Environmental Radioactivity* 102(5): 500-513. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.10.007>
- Baskaran, M., Nix, J., Kuypers, C. & Karunakara, N. 2014. Problems with the dating of sediment core using excess  $^{210}\text{Pb}$  in a Freshwater system impacted by large scale watershed changes. *Journal of Environmental Radioactivity* 138: 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.006>
- Blais, J.M., Kalf, J., Cornett, R.J. & Evans, R.D. 1995. Evaluation of  $^{210}\text{Pb}$  dating in lake sediments using stable Pb, *Ambrosia pollen*, and  $^{137}\text{Cs}$ . *Journal of Paleolimnology* 13(2): 169-178. <https://doi.org/10.1007/BF00678105>
- Bonotto, D.M. & Garcia-Tenorio, R. 2019. Investigating the migration of pollutants at barreiro area, Minas Gerais State, Brazil, by the  $^{210}\text{Pb}$  chronological method. *Journal of Geochemical Exploration* 196(May 2018): 219-234. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.10.011>
- Chen, C., Lai, Z., Beardsley, R.C., Xu, Q., Lin, H. & Viet, N.T. 2012. Current separation and upwelling over the southeast shelf of Vietnam in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117(3): 1-16. <https://doi.org/10.1029/2011JC007150>
- Cook, N., Ehrig, K., Rollog, M., Ciobanu, C., Lane, D., Schmandt, D., Owen, N., Hamilton, T. & Grano, S. 2018.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in geological and related anthropogenic materials: Implications for their mineralogical distribution in base metal ores. *Minerals* 8(5): 5-28. <https://doi.org/10.3390/min8050211>
- Cuthbertson, A.J.S., Ibikunle, O., McCarter, W.J. & Starrs, G. 2016. Monitoring and characterisation of sand-mud sedimentation processes. *Ocean Dynamics* 66(6-7): 867-891. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0958-7>
- Daryabor, F., Tangang, F. & Juneng, L. 2014. Simulation of southwest monsoon current circulation and temperature in the east coast of Peninsular Malaysia. *Sains Malaysiana* 43(3): 389-398.
- Daud, N.R., Akhir, M.F. & Husain, M.L. 2016. Water circulation in the shallow shelf areas off the Terengganu coast affected by wind stress force using a hydrodynamic model. *Journal of Sustainability Science and Management* 11(Special Issue 1): 81-92.
- Florea, N., Cristache, C., Oaie, G. & Dului, O.G. 2011. Concordant  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  ages of Black Sea anoxic unconsolidated sediments. *Geochronometria* 38(2): 101-106. <https://doi.org/10.2478/s13386-011-0022-9>
- Hassellöv, M., Lyvén, B., Bengtsson, H., Jansen, R., Turner, D.R. & Beckett, R. 2001. Particle size distributions of clay-rich sediments and pure clay minerals: A comparison of grain size analysis with sedimentation field-flow fractionation. *Aquatic Geochemistry* 7(2): 155-171. <https://doi.org/10.1023/A:1017905822612>
- He, Q. & Walling, D.E. 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of  $^{137}\text{Cs}$  and unsupported  $^{210}\text{Pb}$  by mineral soils and sediments. *Journal of Environmental Radioactivity* 30(2): 117-137. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(96\)89275-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(96)89275-7)

- Heiden, K. & Holmes, M.A. 1998. 4. Grain-size distribution and significance of clay and clay-sized minerals in eocene to holocene sediments from sites 918 and 919 in the Irminger Basin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* 152: 39-49. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.152.248.1998>
- Ismail, M.I., Eusoff, A.R., Mohamad, A.M., Abd Aziz, S. & Mahendran, B. 1995. The geology of Sarawak deepwater and surrounding areas. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 37: 165-178. <https://gsm.org.my/products/702001-100954-PDF.pdf>
- Iurian, A.R., Millward, G., Blake, W. & Abril Hernández, J.M. 2021. Fine-tuning of  $^{210}\text{Pb}$ -Based methods for dating vegetated saltmarsh sediments. *Quaternary Geochronology* 62(April 2020): 101153. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2021.101153>
- Kaur, A. & Fanourakis, G.C. 2018. Effect of sodium carbonate concentration in calgon on hydrometer analysis results. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 62(4): 866-872. <https://doi.org/10.3311/PPci.9424>
- Kok, P.H., Mohd Akhir, M.F., Tangang, F. & Husain, M.L. 2017a. Spatiotemporal trends in the southwest monsoon wind-driven upwelling in the southwestern part of the South China Sea, edited by deCastro, M. *PLoS ONE* 12(2): e0171979. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171979>
- Kulkarni, S.J., Deshbhandari, P.G. & Jayappa, K.S. 2015. Seasonal variation in textural characteristics and sedimentary environments of beach sediments, Karnataka Coast, India. *Aquatic Procedia* 4 (Icwrcoe): 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.017>
- L.H.N.C. 1962. Physical oceanography of the Southeast Asian waters by Klaus Wyrki NAGA Report Volume 2. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand, 1959-1961. S.I.O., La Jolla, Calif., 1961. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 42(3): 707-707. <https://doi.org/10.1017/S0025315400054370>
- Liu, J., Steinke, S., Vogt, C., Mohtadi, M., De Pol-Holz, R. & Hebbeln, D. 2017. Temporal and spatial patterns of sediment deposition in the Northern South China Sea over the last 50,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 465: 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.10.033>
- Liu, J., Xiang, R., Chen, M., Chen, Z., Yan, W. & Liu, F. 2011. Influence of the Kuroshio current intrusion on depositional environment in the Northern South China Sea: Evidence from surface sediment records. *Marine Geology* 285(1-4): 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.05.010>
- Liu, Z., Wang, H., Hantoro, W.S., Sathiamurthy, E., Colin, C., Zhao, Y. & Li, J. 2012. Climatic and tectonic controls on chemical weathering in tropical Southeast Asia (Malay Peninsula, Borneo, and Sumatra). *Chemical Geology* 291: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.11.015>
- Lozano, R.L., San Miguel, E.G., Bolívar, J.P. & Baskaran, M. 2011. Depositional fluxes and concentrations of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean Coasts in Spain. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 116(18): 1-14. <https://doi.org/10.1029/2011JD015675>
- Mabit, L., Benmansour, M., Abril, J.M., Walling, D.E., Meusburger, K., Iurian, A.R., Bernard, C., Tarján, S., Owens, P.N., Blake, W.H. & Alewell, C. 2014. Fallout  $^{210}\text{Pb}$  as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review. *Earth-Science Reviews* 138: 335-351. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.007>
- Mabit, L., Benmansour, M. & Walling, D.E. 2008. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity* 99(12): 1799-1807. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.08.009>
- Mahmood, Zal U'Yun Wan, Che Abd Rahim Mohamed, Zaharudin Ahmad & Abdul Kadir Ishak. 2011. Intercomparison of techniques for estimation of sedimentation rate in the Sabah and Sarawak coastal waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 287(1): 255-260. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0672-8>
- Mahmood, Zal U'yun Wan, Che Abd Rahim Mohamed, Mei Wo Yii, Zaharudin Ahmad, Kamaruzzaman Ishak & Abdul Kadir Ishak. 2010. Vertical inventories and fluxes of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{226}\text{Ra}$  at Southern South China Sea and Malacca Straits. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 286(1): 107-113. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0631-4>
- Mandal, S., Behera, N., Gangopadhyay, A., Dwi Susanto, R. & Pandey, P.C. 2021. Evidence of a chlorophyll 'tongue' in the Malacca Strait from satellite observations. *Journal of Marine Systems* 223(December 2020): 103610. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103610>
- Masqué, P., Isla, E., Sanchez-Cabeza, J.A., Palanques, A., Bruach, J.M., Puig, P. & Guillén, J. 2002. Sediment accumulation rates and carbon fluxes to bottom sediments at the Western Bransfield Strait (Antarctica). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 49(4-5): 921-933. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00131-X](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00131-X)
- Mebius, L.J. 1960. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. *Analytica Chimica Acta* 22(2): 120-124. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88254-9](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88254-9)
- Merdy, P., Lucas, Y., Coulomb, B., Melfi, A.J. & Montes, C.R. 2021. Soil organic carbon mobility in Equatorial Podzols: Soil column experiments. *Soil* 7(2): 585-594. <https://doi.org/10.5194/soil-7-585-2021>



- Mohamad Arif Che Abd Rahim, Masni Mohd Ali, Wan Zuhairi Wan Yaacob, Abdul Hafidz Yusoff, Shengfa Liu, Xuefa Shi & Che Abd Rahim Mohamed. 2021. Source and sinks of  $^{210}\text{Pb}$  in oceanic margins of East Coast Peninsular Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences* 215: 104812. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2021.104812>
- Not, C., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Polyak, L. & Darby, D. 2008.  $^{210}\text{Pb}$ - $^{226}\text{Ra}$ - $^{230}\text{Th}$  systematics in very low sedimentation rate sediments from the Mendeleev Ridge (Arctic Ocean). *Canadian Journal of Earth Sciences* 45(11): 1207-1219. <https://doi.org/10.1139/E08-047>
- Nozaki, Y., Ikuta, N. & Yashima, M. 1990. Unusually large  $^{210}\text{Po}$  deficiencies relative to  $^{210}\text{Pb}$  in the Kuroshio Current of the East China and Philippine Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 95(C4): 5321-5329. <https://doi.org/10.1029/JC095iC04p05321>
- Nur Hidayah Roseli, Mohd Fadzil Akhir, Mohd Lokman Husain, Fredolin Tangang & Azizi Ali. 2015. Water mass characteristics and stratification at the shallow Sunda Shelf of Southern South China Sea. *Open Journal of Marine Science* 5(4): 455-467. <https://doi.org/10.4236/ojms.2015.54036>
- Peterson, G.S., Ankley, G.T. & Leonard, E.N. 1996. Effect of Bioturbation on metal-sulfide oxidation in surficial freshwater sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry* 15(12): 2147-2155. <https://doi.org/10.1002/etc.5620151210>
- Pittauerová, D., Hettwig, B. & Fischer, H.W. 2011. Pb-210 sediment chronology: Focused on supported lead. *Radioprotection* 46(6): 277-282. <https://doi.org/10.1051/radiopro/20116666s>
- Prakash, M.M., Kaliprasad, C.S. & Narayana, Y. 2018. Studies on distribution of  $^{210}\text{Pb}$  in the illuviated soil of Virajpet Taluk, Coorg District. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 315(2): 315-322. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5679-y>
- Rafei, M. & Kennedy, M. 2019. Weathering in a world without terrestrial life recorded in the Mesoproterozoic Velkerri Formation. *Nature Communications* 10(1): 3448. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11421-4>
- Ramaswamy, V., Rao, P.S. Rao, K.H., Thwin, S., Srinivasa Rao, N. & Raiker, V. 2004. Tidal Influence on suspended sediment distribution and dispersal in the Northern Andaman Sea and Gulf of Martaban. *Marine Geology* 208(1): 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.04.019>
- Raygoza-Viera, J.R., Ruiz-Fernández, A.C., Ruelas-Inzunza, J., Alonso-Hernández, C., Pérez-Bernal, L.H. & Páez-Osuna, F. 2014. Accumulation and distribution of Hg and  $^{210}\text{Pb}$  in superficial sediments from a coastal lagoon in the SE Gulf of California associated with urban-industrial and port activities. *Environmental Earth Sciences* 72(8): 2729-2739. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3178-9>
- Rizal, S., Damm, P., Wahid, M.A., Sündermann, J., Ilhamsyah, Y., Iskandar, T. & Muhammad. 2012. General circulation in the Malacca Strait and Andaman Sea: A numerical model study. *American Journal of Environmental Sciences* 8(5): 479-488. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.479.488>
- Sathiamurthy, E. & Md Mostafizur Rahman. 2017. Late quaternary paleo fluvial system research of Sunda Shelf: A review. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 64 (December): 81-92. <https://doi.org/10.7186/bgsm64201708>
- Schroeder, A., Wiesner, M.G. & Liu, Z. 2015. Fluxes of clay minerals in the South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters* 430: 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.001>
- Schumacher, B.A. 2002. Methods for the determination of total organic carbon in soils and sediments. *Carbon* 32(April): 25. <https://doi.org/http://epa.gov/esd/cmb/research/papers/bs116.pdf>
- Seo, H., Dong, J.J. & Kim, G. 2021. Contrasting behaviors of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the productive shelf water versus the oligotrophic water. *Frontiers in Marine Science* 8(July): 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.701441>
- Staub, J.R., Among, H.L. & Gastaldo, R.A. 2000. Seasonal sediment transport and deposition in the Rajang River Delta, Sarawak, East Malaysia. *Sedimentary Geology* 133(3-4): 249-264. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00042-7)
- Szabo, Z., Stackelberg, P.E. & Cravotta, C.A. 2020. Occurrence and geochemistry of Lead-210 and Polonium-210 radionuclides in public-drinking-water supplies from principal aquifers of the United States. *Environmental Science and Technology* 54(12): 7236-7249. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00192>
- Szczuciński, W., Statterger, K. & Scholten, J. 2009. Modern sediments and sediment accumulation rates on the narrow shelf off Central Vietnam, South China Sea. *Geo-Marine Letters* 29(1): 47-59. <https://doi.org/10.1007/s00367-008-0122-6>
- Tang, D.L., Kawamura, H., Shi, P., Takahashi, W., Guan, L., Shimada, T., Sakaida, F. & Isoguchi, O. 2006. Seasonal phytoplankton blooms associated with monsoonal influences and coastal environments in the sea areas either side of the Indochina Peninsula. *Journal of Geophysical Research* 111(G1): G01010. <https://doi.org/10.1029/2005JG000050>
- Tangang, F.T., Xia, C., Qiao, F., Juneng, L. & Shan, F. 2011. Seasonal circulations in the Malay Peninsula Eastern continental shelf from a wave-tide-circulation coupled model. *Ocean Dynamics* 61(9): 1317-1328. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0432-5>
- Tongkul, F. 1991. Tectonic evolution of Sabah, Malaysia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences* 6(3-4): 395-405. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(91\)90084-B](https://doi.org/10.1016/0743-9547(91)90084-B)
- Wang, A.J., Chui, W.B., Yong, H.X., Amir Hassan, M.H., Ye, X., Abu Bakar, A.F., Li, Y.H., Lai, Z.K., Xu, J. & Loh, K.H. 2017. Assessment of heavy metal pollution in surficial sediments from a tropical river-estuary-shelf system: A case study of Kelantan River, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin* 125(August): 492-500. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.010>

- Wang, C., Chen, M., Qi, H., Intasen, W. & Kanchanapant, A. 2020. Grain-size distribution of surface sediments in the Chanthaburi Coast, Thailand and implications for the sedimentary dynamic environment. *Journal of Marine Science and Engineering* 8(4): 242. <https://doi.org/10.3390/JMSE8040242>
- Wang, X., Liu, Z. & Peng, S. 2017. Impact of tidal mixing on water mass transformation and circulation in the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography* 47(2): 419-432. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0171.1>
- Watson, S.J., Cade-Menun, B.J., Needoba, J.A. & Peterson, T.D. 2018. Phosphorus forms in sediments of a river-dominated estuary. *Frontiers in Marine Science* 5(SEP): 1-11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00302>
- Wei, C.L., Lin, S.Y., Sheu, D.D.D., Chou, W.C., Yi, M.C., Santschi, P.H. & Wen, L.S. 2011. Particle-reactive radionuclides ( $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) as tracers for the estimation of export production in the South China Sea. *Biogeosciences* 8(12): 3793-3808. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3793-2011>
- Wei, C. L., Yi, M.C., Lin, S.Y., Wen, L.S. & Lee, W.H. 2014. Seasonal distributions and fluxes of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the Northern South China Sea. *Biogeosciences* 11(23): 6813-6826. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6813-2014>
- Yang, W., Guo, L., Chuang, C.Y., Santschi, P.H., Schumann, D. & Ayrarov, M. 2015. Influence of organic matter on the adsorption of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  and  $^7\text{Be}$  and their fractionation on nanoparticles in seawater. *Earth and Planetary Science Letters* 423: 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.007>
- Zhang, Q., Tao, Z., Ma, Z., Gao, Q., Deng, H., Xu, P., Ding, J., Wang, Z. & Lin, Y. 2019. Hydro-ecological controls on riverine organic carbon dynamics in the tropical monsoon region. *Scientific Reports* 9(1): 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48208-y>
- Zhao, G., Ye, S., Yuan, H., Ding, X. & Wang, J. 2017. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the Pearl River Estuary, China. *Environmental Science and Pollution Research* 24(3): 2966-2979. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8003-4>

\*Pengarang untuk surat-menyurat: email: carmohd@ukm.edu.my