

## Aktiviti $^{210}\text{Pb}$ dalam $\text{PM}_{10}$ di Pesisir Pantai Timur Semenanjung Malaysia ( $^{210}\text{Pb}$ Activity in $\text{PM}_{10}$ on the East Coast of Peninsular Malaysia)

SITI MUNIRAH JOHARI<sup>1</sup>, SHENGFA LIU<sup>2</sup>, XUEFA SHI<sup>2</sup>, CHE ABD. RAHIM MOHAMED<sup>1</sup> & MASNI MOHD ALI<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>2</sup>Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 266061, No. 6, Xianxialing Rd. Qingdao, People Republic of China

Diserahkan: 19 Januari 2024/Diterima: 17 Oktober 2024

### ABSTRAK

Radionuklid semula jadi  $^{210}\text{Pb}$  kerap digunakan sebagai penyurih untuk mengkaji proses atmosfera dan pengangkutan jarak jauh bahan pencemar dalam ruang udara.  $^{210}\text{Pb}$  yang melekat pada zarah  $\text{PM}_{10}$  telah melalui proses penggarutan yang dipengaruhi oleh pelbagai faktor sekitaran. Objektif kajian ini adalah untuk menentukan hubungan antara aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dan faktor meteorologi di pantai timur Semenanjung Malaysia. Pensampelan  $\text{PM}_{10}$  telah dijalankan pada tahun 2007 oleh Jabatan Meteorologi Malaysia di stesen meteorologi Kota Bharu, Kuantan dan Mersing. Sampel  $\text{PM}_{10}$  dihadam sepenuhnya dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dihitung menggunakan Spektrometri Pembilang Kasar Alfa Beta. Kota Bharu, Kuantan dan Mersing menunjukkan kepekatan  $\text{PM}_{10}$  maksimum pada Monsun Barat Daya dengan nilai  $82.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $47.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dan  $51.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , selari dengan bilangan titik panas di Kepulauan Riau, Indonesia. Julat aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  pada tahun 2007 adalah  $0.25 - 1.17 \text{ mBq}/\text{m}^3$  (Kota Bharu),  $0.13 - 0.86 \text{ mBq}/\text{m}^3$  (Kuantan) dan  $0.15 - 0.84 \text{ mBq}/\text{m}^3$  (Mersing).  $^{210}\text{Pb}$  merekodkan aktiviti maksimum semasa Monsun Barat Daya bagi Kuantan dan Mersing masing-masing dengan purata  $0.64 \pm 0.08 \text{ mBq}/\text{m}^3$  dan  $0.58 \pm 0.08 \text{ mBq}/\text{m}^3$ . Manakala, Kota Bharu merekodkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  maksimum semasa Monsun Timur Laut dengan purata  $0.70 \text{ mBq}/\text{m}^3$ . Analisis korelasi Pearson dan regresi linear menunjukkan korelasi yang negatif antara jumlah hujan harian (unit: mm) dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di pesisir pantai Semenanjung Malaysia. Selain itu, terdapat korelasi positif antara aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dengan suhu. Ini menunjukkan bahawa jumlah hujan harian dan suhu adalah faktor-faktor penting yang mempengaruhi aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam  $\text{PM}_{10}$  pesisir pantai.

Kata kunci: Asia tenggara; meteorologi; monsun;  $\text{PM}_{10}$ ;  $^{210}\text{Pb}$

### ABSTRACT

Natural radionuclide  $^{210}\text{Pb}$  is frequently used as an indicator in studying atmospheric processes and the long-range transport of pollutants in the atmosphere.  $^{210}\text{Pb}$  that is attached to  $\text{PM}_{10}$  particles has undergone scavenging process that influenced by various environmental factors. The objective of this study was to determine the relationship between  $^{210}\text{Pb}$  activity and meteorological factors on the east coast of Peninsular Malaysia.  $\text{PM}_{10}$  sampling was conducted in 2007 by the Malaysia Meteorological Department at Kota Bharu, Kuantan, and Mersing meteorological stations.  $\text{PM}_{10}$  samples were completely digested, and  $^{210}\text{Pb}$  activity was quantified using Gross Alpha-Beta Spectrometry. Kota Bharu, Kuantan, and Mersing exhibited maximum  $\text{PM}_{10}$  concentration during the Southwest Monsoon with  $82.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $47.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and  $51.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, parallel to the number of hotspots recorded in Riau Islands, Indonesia. The range of  $^{210}\text{Pb}$  activity in 2007 was  $0.25 - 1.17 \text{ mBq}/\text{m}^3$  (Kota Bharu),  $0.13 - 0.86 \text{ mBq}/\text{m}^3$  (Kuantan), and  $0.15 - 0.84 \text{ mBq}/\text{m}^3$  (Mersing). The  $^{210}\text{Pb}$  recorded maximum activity during Southwest Monsoon in Kuantan and Mersing, with an average of  $0.64 \text{ mBq}/\text{m}^3$  and  $0.58 \text{ mBq}/\text{m}^3$ , respectively. Meanwhile, Kota Bharu recorded maximum  $^{210}\text{Pb}$  activity during the Northeast Monsoon with average of  $0.70 \text{ mBq}/\text{m}^3$ . Pearson's correlation and linear regression analyses showed a negative correlation between the amount of daily rainfall (unit: mm) and  $^{210}\text{Pb}$  activity at the coast of Peninsular Malaysia. Additionally, there was a positive correlation between  $^{210}\text{Pb}$  activity and temperature. This shows that the amount of daily rainfall and temperature are important factors that influence the activity of  $^{210}\text{Pb}$  in coastal  $\text{PM}_{10}$ .

Keywords: Meteorology; monsoon;  $\text{PM}_{10}$ ; Southeast Asia;  $^{210}\text{Pb}$

## PENGENALAN

Monsun merupakan suatu fenomena semula jadi yang berlaku sepanjang tahun di Asia Tenggara. Sistem cuaca monsun merupakan kesan daripada perbezaan suhu antara darat dan lautan disebabkan oleh radiasi solar (Gadgil et al. 2021). Fenomena monsun yang berlaku ini dikenali sebagai sistem monsun Asia Timur yang merupakan sebahagian daripada sistem iklim moden (Loo, Billa & Singh 2015). Dua sistem utama monsun ini lebih dikenali sebagai sebagai Monsun Timur Laut (MTL; musim sejuk/basah) bermula dari bulan November hingga Mac dan Monsun Barat Daya (MBD; musim panas/kering) pada bulan Mei sehingga September. Manakala, bulan April dan Oktober kebiasaannya dikategorikan sebagai musim peralihan monsun (Cruz et al. 2013; Juneng et al. 2009). Perubahan monsun yang berlaku turut mengubah arah mata angin sekali gus mengubah cuaca dan suhu setempat (Jabatan Meteorologi Malaysia 2019).

Perubahan arah angin semasa musim monsun membawa bahan terampai dalam udara daripada pelbagai sumber.  $PM_{10}$  merupakan bahan terampai dengan saiz diameter kurang daripada 10  $\mu m$  yang wujud dalam atmosfera.  $PM_{10}$  berasal daripada pelbagai sumber antropogen seperti pelepasan daripada kenderaan, proses industri dan aktiviti semula jadi seperti kebakaran hutan dan ribut debu (Islam et al. 2015). Kandungan  $PM_{10}$  di kawasan pesisir pantai kebiasaannya mengandungi garam laut (37%), nitrat sekunder dan sulfat (41%) serta hasil pembakaran biojisim (10%) (Ledoux et al. 2023). Selain itu,  $PM_{10}$  pesisir pantai juga terdiri daripada habuk mineral (43.1%) (Wang et al. 2023a). Ini menjadikan atmosfera sebagai suatu medium yang penting dalam mengangkut bahan terampai dari daratan ke lautan atau sebaliknya. Kewujudan zarah aerosol dalam atmosfera adalah hasil gabungan aerosol setempat melalui pengangkutan jarak jauh oleh bawaan angin yang mana 9% hingga 57% bergantung kepada musim (Kassem 2014; Xin, Wang & Chen 2016).

Radionuklid semula jadi seperti  $^{210}Pb$  juga dibawa oleh  $PM_{10}$  di dalam atmosfera.  $^{210}Pb$  terhasil daripada pereputan induknya  $^{222}Rn$  yang dilepaskan ke dalam ruang udara dari kawasan daratan yang mana 99% kandungan  $^{222}Rn$  di dalam atmosfera terbebas dari tanah dan batuan (Zhang et al. 2021).  $^{210}Pb$  melekat pada zarah  $PM_{10}$  melalui proses penggarutan yang dipengaruhi oleh pelbagai faktor sekitar. Kajian lepas menyatakan terdapat korelasi positif yang signifikan antara aktiviti  $^{210}Pb$  dan kepekatan  $PM_{10}$ , terutamanya ketika musim jerebu (Basile, Burlon & Tomarchio 2019; Biernacik & Zalewska 2023; Deng et al. 2020; Mohan et al. 2018). Ini menunjukkan bahawa pertambahan kepekatan  $PM_{10}$  membawa kepada peningkatan garutan  $^{210}Pb$  di dalam atmosfera (Deng et al. 2020).

$^{210}Pb$  merupakan salah satu radionuklid semula jadi yang digunakan sebagai penyurih bagi proses atmosfera dan pengangkutan jarak jauh bahan pencemar dalam

atmosfera (Cai, Yamazawa & Iimoto 2023; Cuesta et al. 2022). Taburan radionuklid mampu menunjukkan bahawa jisim udara memberi kesan terhadap kadar pemendapan bahan pencemar di sepanjang kawasan pesisir pantai (Yamazawa et al. 2022). Antara faktor yang memainkan peranan utama dalam pencirian jisim udara dan perubahan corak aktiviti  $^{210}Pb$  dalam  $PM_{10}$  adalah suhu, kelembapan relatif, kestabilan atmosfera yang dipengaruhi oleh tekanan atmosfera, iklim kawasan kajian (tropika, maritim atau kutub) dan kepekatan  $PM_{10}$  (Biernacik & Zalewska 2023; Mohan et al. 2018; Zalewska, Biernacik & Marosz 2021).

Keadaan cuaca dan musim berserta proses dinamik yang berlaku dalam ruangan atmosfera mampu menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap kecekapan penyingkiran zarah aerosol (Długosz-Lisiecka 2021). Pemahaman terhadap hubungan aktiviti  $^{210}Pb$  dan faktor meteorologi adalah penting untuk mentafsir kegunaannya dengan tepat sebagai penyurih dalam kajian atmosfera dan sekitaran. Oleh itu, kajian berkenaan hubungan tentang faktor persekitaran ini mampu menyumbang kepada pemahaman yang lebih baik, seterusnya meningkatkan kebolehgunaannya dalam bidang penyelidikan atmosfera dan alam sekitar. Maka, objektif kajian ini ialah untuk menentukan hubungan antara faktor meteorologi iaitu suhu setempat, jumlah hujan harian dan kepekatan  $PM_{10}$  yang berkemungkinan memainkan peranan dalam mempengaruhi aktiviti  $^{210}Pb$  di pantai timur Semenanjung Malaysia.

## BAHAN DAN KAEDAH

### LOKASI DAN KAEDAH PENSAMPELAN

Pensampelan  $PM_{10}$  (bahan terampai yang berdiameter <10  $\mu m$ ) telah dilakukan oleh Jabatan Meteorologi Malaysia (JMM) di tiga stesen meteorologi di pantai timur Semenanjung Malaysia iaitu Kota Bharu, Kuantan dan Mersing. Lokasi dan tempoh pensampelan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 dan Jadual 1. Ketiga-tiga lokasi pensampelan berada berdekatan dengan kawasan pinggir pantai dengan ketinggian 4.4 - 43.6 m daripada aras laut (Jadual 1).  $PM_{10}$  telah disampel menggunakan pensampel udara isi padu tinggi. Pensampelan telah dijalankan pada minggu kedua atau ketiga setiap bulan sepanjang tahun 2007.

Sampel  $PM_{10}$  dan data meteorologi tahun 2007 digunakan berikutan kejadian jerebu yang jelas memberi kesan kepada Malaysia dan rantau Asia Tenggara semasa Monsun Barat Daya dan pencemaran rentas sempadan daripada negara jiran (Khairul Anuar, Banu Samsudin & Majid 2023; Ma'amor et al. 2023). Kedua-dua kajian ini menunjukkan kepekatan  $PM_{10}$  yang tinggi semasa musim jerebu (Jun hingga Oktober). Ini dibuktikan dengan pertambahan kes hospital bagi penyakit berkaitan pernafasan, terutamanya di kawasan bandar yang membangun pesat (Hanafi et al. 2019).



RAJAH 1. Lokasi pensampelan di pantai timur Semenanjung Malaysia

JADUAL 1. Lokasi dan tarikh pensampelan PM<sub>10</sub> yang dilakukan oleh JMM

Stesen	Kota Bharu	Kuantan	Mersing
Koordinat	06°10'U 102°18'T	03°47'U 103°13'T	02°27'U 103°50'T
Min Ketinggian dari Aras Laut (m)	4.4	15.3	43.6
Tarikh pensampelan bagi semua stesen	14/01/2007	14/05/2007	17/09/2007
	13/02/2007	13/06/2007	17/10/2007
	15/03/2007	13/07/2007	16/11/2007
	14/04/2007	15/08/2007	16/12/2007

ANALISIS RADIONUKLID  $^{210}\text{Pb}$ 

Kertas turas yang digunakan untuk memerangkap bahan terampai,  $\text{PM}_{10}$  dipotong kepada saiz  $81 \text{ cm}^2$  dan beratnya direkodkan. Kertas turas dipotong kepada bahagian yang lebih kecil ( $1 \text{ cm}^2$ ) supaya proses pencernaan menjadi lengkap. Penghadaman mutlak dijalankan ke atas sampel yang telah ditambah pembawa Pb,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  ( $29.69 \text{ mg/mL}$ ) menggunakan asid nitrik ( $\text{HNO}_3$ ) pekat, asid hidroklorik ( $\text{HCl}$ ) pekat dan asid hidrofluorik ( $\text{HF}$ ) dengan nisbah 4:4:1. Pembawa Pb diguna untuk menentukan hasil perolehan bagi aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  yang ingin diperolehi dalam kajian. Sampel kemudian dipanaskan dengan suhu  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  selama 3 jam (Sabuti 2014). Asid yang digunakan bertindak menghancurkan komponen organik dan tak organik di dalam sampel.

Kemudian, larutan sampel dikeringkan sebelum dilarut dengan  $20 \text{ mL HCl}$  dan  $5 \text{ mL}$  hidrogen peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) untuk menguraikan bahan organik yang masih tersisa di dalam sampel. Sampel dikering dan dilarutkan dengan  $\text{HNO}_3$   $1 \text{ M}$ . Pembawa Fe,  $\text{FeOH}$  ( $25 \text{ mg/mL}$ ) dan larutan amonia dimasukkan ke dalam sampel sehingga mendakan berwarna jingga terhasil (Sabuti 2014). Pembawa Fe diguna untuk memekatkan kandungan  $^{210}\text{Pb}$  dalam sampel yang mana pada pH 9-10 ia telah terbukti berkesan untuk ekstrak (Jia et al. 2001). Mendakan kemudiannya diempas pada kelajuan  $4000 \text{ rpm}$ . Seterusnya, mendakan dilarut dan penganapan-elektro dijalankan. Mendakan plumbum (II) oksida yang terenalap pada kasa platinum dikumpul dan dikeringkan sebelum dilarutkan dengan  $\text{HNO}_3$   $1 \text{ M}$  dan asid sulfurik ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) pekat. Sampel kemudiannya dituras dan dibiarkan selama 25 hari bagi tempoh pertumbuhan  $^{210}\text{Bi}$  sebelum dihitung menggunakan Spektrometri Pembilang Kasar Alfa Beta (Canberra *Gross Alpha Beta Spectrometry*). *Standard Reference Material* (SRM) IAEA-385 (Irish Sea Sediment) telah digunakan dengan nilai perolehan 75% sebagai kawalan kualiti bagi kajian ini. Nilai kecekapan pengiraan bagi Spektrometri Pembilang Kasar Alfa Beta adalah 32% dengan bacaan latar belakang beta yang rendah iaitu  $0.8 \text{ cpm}$  (bilangan per minut).

## ANALISIS STATISTIK DAN PEMODELAN KOMPUTER

Analisis HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Intergrated Trajectory*) daripada NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) dilakukan bagi menentukan trajektori kebelakang jisim angin untuk penentuan arah angin menghala ke kawasan pantai timur Semenanjung Malaysia (Stein et al. 2015). Ini sekali gus memudahkan penentuan musim monsun yang dialami setiap bulan sepanjang tahun 2007. Selain daripada itu, data meteorologi asas yang diperolehi sebagai data sekunder daripada JMM iaitu suhu setempat, jumlah hujan harian dan kepekatan  $\text{PM}_{10}$  juga digunakan sebagai pengukuhan kepada penentuan musim pada tahun 2007. Analisis statistik seperti analisis korelasi Pearson dan

analisis regresi juga dilakukan dengan menggunakan data aktiviti  $^{210}\text{Pb}$ , suhu, jumlah hujan harian dan kepekatan  $\text{PM}_{10}$ . Ini bertujuan untuk menentukan faktor meteorologi yang mempengaruhi perubahan corak aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam ruang udara pantai timur Semenanjung Malaysia.

## HASIL DAN PERBINCANGAN

VARIASI KEPEKATAN  $\text{PM}_{10}$  DAN TRAJEKTORI ANGIN SEPANJANG TAHUN 2007

Imej pergerakan angin melalui analisis model HYSPLIT ditunjukkan dalam Rajah S1 sebagai data tambahan. Imej dikategorikan mengikut tarikh dan lokasi pensampelan yang bertempat di pantai timur Semenanjung Malaysia. Melalui Rajah S1 dan Jadual 2, bulan Januari hingga April, November dan Disember jelas menunjukkan arah angin daripada timur laut, menjadikan tempoh ini adalah MTL. Manakala bulan Jun hingga September dicirikan oleh angin dari arah barat daya, menjadikan tempoh ini sebagai MBD. Bulan Mei dan Oktober pula jelas menunjukkan penerimaan angin dari pelbagai arah dan tidak tetap merupakan tempoh peralihan monsun antara dua monsun utama. Perbincangan selanjutnya melibatkan  $\text{PM}_{10}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  dan faktor meteorologi adalah berpandukan musim monsun yang telah dinyatakan.

Rajah 2 menunjukkan purata bulanan kepekatan  $\text{PM}_{10}$  di pantai timur Semenanjung Malaysia sepanjang tahun 2007. Kajian ini merekodkan kandungan maksimum  $\text{PM}_{10}$  adalah pada bulan Julai bagi kedua-dua stesen Kota Bharu ( $36.37 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) dan Kuantan ( $33.07 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ). Manakala stesen Mersing merekodkan kepekatan  $\text{PM}_{10}$  maksimum pada bulan Februari ( $33.22 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ). Sebaliknya, kepekatan  $\text{PM}_{10}$  minimum adalah pada bulan Mei ( $21.26 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ), Januari ( $13.28 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) dan April ( $16.32 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ), masing-masing di Kota Bharu, Kuantan dan Mersing. Purata kepekatan  $\text{PM}_{10}$  bagi tahun 2007 yang direkodkan di Kota Bharu (julat:  $3.1 - 82.7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ), Kuantan (julat:  $8.4 - 47.9 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) dan Mersing (julat:  $10.5 - 51.9 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) masing-masing adalah  $28.7 \pm 5.0 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ,  $24.6 \pm 5.3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  dan  $22.3 \pm 5.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  (Jadual 3).

Walaupun kawasan kajian ini terletak berdekatan kawasan perairan pantai timur Semenanjung Malaysia, kesemua lokasi ini merekodkan perbezaan corak kepekatan  $\text{PM}_{10}$ . Kota Bharu dan Kuantan menunjukkan bacaan purata kepekatan  $\text{PM}_{10}$  yang paling tinggi semasa MBD, masing-masing dengan bacaan  $28.2 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  dan  $29.2 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ . Manakala stesen Mersing mempunyai purata kepekatan  $\text{PM}_{10}$  yang tinggi, pada kedua-dua MBD dan MTL, masing-masing dengan kepekatan  $25.6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  dan  $21.2 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  (dwi-mod). Keputusan ini juga adalah selari dengan kajian yang dijalankan oleh Sabuti (2014) di stesen meteorologi Mersing. Ciri dwi-mod ini berkemungkinan membawa sumber dari utara ASEAN melalui angin timuran dan timur laut di dalam ruang atmosfera semasa MTL serta dari selatan ASEAN melalui angin selatan dan barat daya semasa MBD.

Jadual 3 jelas menunjukkan purata kepekatan  $PM_{10}$  yang tinggi semasa MBD di stesen Kuantan ( $29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dan Mersing ( $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Secara lazim, kadar naik turun kepekatan  $PM_{10}$  di Semenanjung Malaysia adalah lebih tinggi pada musim kering (MBD). Ini berikutan angin aras rendah setempat dari arah selatan dan barat daya semasa musim kering dan panas terutamanya di kawasan barat dan barat daya Semenanjung Malaysia (Juneng et al. 2009). Kajian yang dijalankan oleh Ma'amor et al. (2023) di beberapa bandar utama di Malaysia dan kajian oleh Zalakeviciute et al. (2020) di bandar Andean, Amerika Selatan juga merekodkan perbezaan bermusim pada zarah bersaiz kasar ( $PM_{10}$ ) dan telah mencatatkan kepekatan paling tinggi semasa MBD (musim panas) dan lebih rendah semasa MTL (musim sejuk).

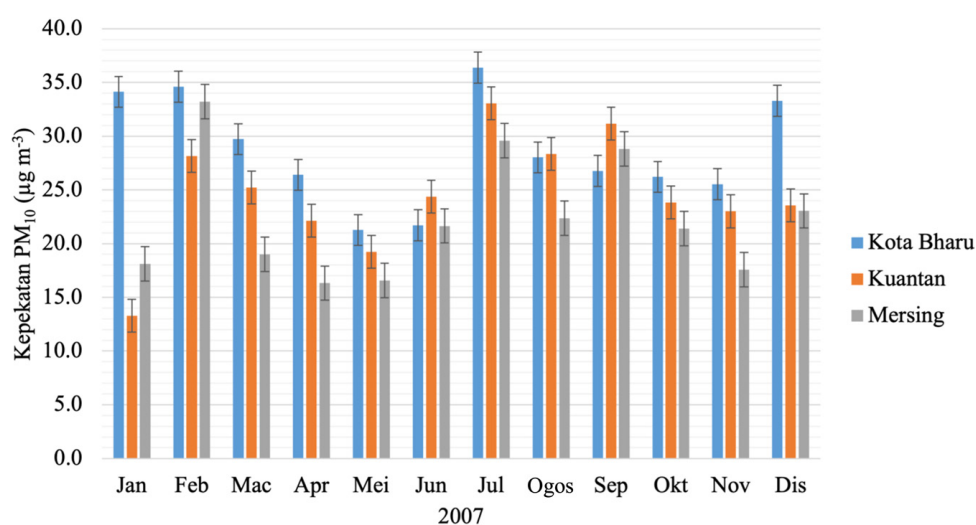
Kandungan  $PM_{10}$  di dalam atmosfera juga dipengaruhi oleh bilangan 'titik panas' yang wujud pada musim panas semasa MBD antara Jun – Oktober hasil daripada kejadian kebakaran hutan atau kawasan tanaman (Anwar et al. 2010). Berdasarkan Jadual 4, Kepulauan Riau, Indonesia

merekodkan bilangan titik panas antara yang tertinggi pada bulan Februari, Jun, Julai dan Ogos tahun 2007. Pergerakan angin dari arah barat daya yang melalui kawasan Kepulauan Riau (Rajah S1) membawa bersama sumber bahan pencemar ini, sekali gus merekodkan kepekatan  $PM_{10}$  maksimum pada bulan Julai di stesen Kota Bharu dan Kuantan. Menurut Anwar et al. (2010) lagi, bilangan 'titik panas' dan kepekatan  $PM_{10}$  memberi korelasi positif yang sederhana,  $r^2 = 0.55$  ( $p < 0.05$ ). Ini membuktikan bahawa  $PM_{10}$  merupakan bahan pencemar utama yang diangkut bersama semasa pembakaran bahan biojisim.

Berdasarkan analisis model HYSPLIT dalam Rajah S1, pergerakan jisim udara pada tarikh 14 Mei 2007 (Kota Bharu) dan 14 Januari 2007 (Kuantan) menunjukkan pergerakan angin yang menghala ke arah Kota Bharu dan Kuantan berada pada altitud antara 1500-3000 m di atas paras tanah (AGL). Stesen Mersing juga menerima jisim udara yang bergerak pada altitud yang sangat tinggi iaitu antara 2000-3500 m AGL pada 14 April dan 14 Mei 2007. Semasa tempoh kesemua lokasi ini menerima pergerakan jisim

JADUAL 2. Arah angin bulanan di kawasan pantai timur Semenanjung Malaysia yang direkodkan sepanjang tahun 2007 melalui analisis model HYSPLIT daripada laman sesawang NOAA. Perincian arah angin bersama altitud perlu dirujuk pada Rajah S1

Bulan	Arah angin	Musim
Januari - April November - Disember	Timur laut	Monsun Timur Laut (MTL)
Jun - September	Barat daya	Monsun Barat Daya (MBD)
Mei, Oktober	Tidak tetap, datang daripada pelbagai arah	Peralihan monsun (P)



Sumber: Jabatan Meteorologi Malaysia

RAJAH 2. Variasi purata bulanan kepekatan  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) di Kota Bharu, Kuantan dan Mersing sepanjang tahun 2007

udara pada altitud tertinggi, kepekatan  $PM_{10}$  direkodkan paling rendah pada tahun 2007 (purata kepekatan  $PM_{10}$   $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ini membuktikan bahawa altitud memainkan peranan yang penting dalam proses pengangkutan dan penyebaran zarah  $PM_{10}$  di sesebuah kawasan (Choudhary et al. 2022; Jaén et al. 2023). Perbezaan altitud memberi kesan kepada jumlah pengangkutan bahan cemar daripada sumbernya (Shen et al. 2016) dan kestabilan atmosfera

(Pani, Panda & Baliarsingh 2020). Ketinggian altitud menjadikan ia semakin jauh dari kawasan perindustrian atau pusat bandar yang memberi sumber  $PM_{10}$  yang signifikan, sekali gus memerangkap  $PM_{10}$  yang lebih rendah. Altitud yang lebih tinggi juga mengalami pelbagai corak angin yang berbeza menjadikan keadaan atmosfera yang tidak stabil. Ketidakstabilan atmosfera di altitud yang tinggi secara tidak langsung memudahkan proses

JADUAL 3. Variasi purata kepekatan  $PM_{10}$  dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  pada tahun 2007 dan musim bagi ketiga-tiga stesen pensampelan di pantai timur Semenanjung Malaysia

Parameter	Tahunan (Jan-Dis 2007)	Monsun Timur Laut (Jan-Apr; Nov-Dis)	Peralihan Monsun (Mei; Okt)	Monsun Barat Daya (Jun-Sept)
<b>Kota Bharu</b>				
$PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$28.66 \pm 5.00$	$30.61 \pm 4.00$	$23.73 \pm 3.50$	$28.21 \pm 6.10$
$^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq}/\text{m}^3$ )	$0.64 \pm 0.11$	$0.70 \pm 0.12$	$0.59 \pm 0.10$	$0.56 \pm 0.11$
<b>Kuantan</b>				
$PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$24.61 \pm 5.30$	$22.55 \pm 5.01$	$21.53 \pm 3.27$	$29.24 \pm 3.78$
$^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq}/\text{m}^3$ )	$0.50 \pm 0.07$	$0.45 \pm 0.06$	$0.38 \pm 0.06$	$0.64 \pm 0.08$
<b>Mersing</b>				
$PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$22.30 \pm 5.52$	$21.21 \pm 6.31$	$18.98 \pm 3.42$	$25.60 \pm 4.17$
$^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq}/\text{m}^3$ )	$0.51 \pm 0.07$	$0.47 \pm 0.06$	$0.51 \pm 0.07$	$0.58 \pm 0.08$

JADUAL 4. Bilangan titik panas yang direkodkan di Pekanbaru, Kepulauan Riau, Indonesia sepanjang tahun 2007 (Anwar et al. 2010)

Bulan	Bilangan titik panas
Januari	59
Februari	133
Mac	0
April	78
Mei	50
Jun	178
Julai	413
Ogos	349
September	86
Oktober	64
November	46
Disember	0

percampuran zarah secara menegak seterusnya memberi kesan kepada penyebaran  $PM_{10}$  dengan kepekatan yang lebih rendah kepada sesuatu kawasan (Zhang et al. 2020).

#### TABURAN $^{210}Pb$ DALAM $PM_{10}$ DI RUANGAN ATMOSFERA

Rajah 3 menunjukkan aktiviti  $^{210}Pb$  sepanjang tahun 2007. Kota Bharu merekodkan julat aktiviti  $^{210}Pb$  yang paling tinggi dengan bacaan 0.25 - 1.17  $mBq/m^3$ . Manakala, Kuantan dan Mersing masing-masing mempunyai julat 0.13 - 0.86  $mBq/m^3$  dan 0.15 - 0.84  $mBq/m^3$ . Purata tahunan aktiviti  $^{210}Pb$  adalah  $0.64 \pm 0.11$   $mBq/m^3$  (Kota Bharu),  $0.50 \pm 0.07$   $mBq/m^3$  (Kuantan) dan  $0.51 \pm 0.07$   $mBq/m^3$  (Mersing). MTL merekodkan purata aktiviti  $^{210}Pb$  yang maksimum di Kota Bharu ( $0.70 \pm 0.12$   $mBq/m^3$ ). Ini berbeza dengan Kuantan dan Mersing yang menerima aktiviti  $^{210}Pb$  maksimum semasa MBD dengan bacaan  $0.64 \pm 0.08$   $mBq/m^3$  dan  $0.58 \pm 0.08$   $mBq/m^3$  (Jadual 2).

Ketiga-tiga stesen menunjukkan corak aktiviti  $^{210}Pb$  yang sama dengan peningkatan aktiviti  $^{210}Pb$  semasa MTL di suku pertama tahun 2007 sehingga MBD pada pertengahan tahun dan aktiviti kembali menurun kepada MTL pada hujung tahun 2007. Aktiviti  $^{210}Pb$  menunjukkan peningkatan semasa bulan Januari hingga April. Ini berkemungkinan disebabkan oleh jumlah hujan harian yang semakin berkurangan pada awal tahun (Mohan et al. 2018; Wan et al. 2008) berbanding semasa hujung tahun pada bulan November hingga Disember (Rajah 4). Purata jumlah hujan harian adalah 3.1 mm (Jan-Apr) dan 7.5 mm (Nov-Dis) di Kota Bharu, 5.7 mm (Jan-Apr) dan 18.7 mm (Nov-Dis) bagi Kuantan. Manakala, Mersing menerima purata jumlah hujan sebanyak 9.0 mm (Jan-Apr) dan 14.5 mm (Nov-Dis). Ini jelas menunjukkan kawasan pantai timur Semenanjung Malaysia menerima jumlah hujan yang tinggi pada hujung tahun 2007 berbanding awal tahun dengan perbezaan yang sangat ketara.

MTL (Nov-Dis) menerima jumlah hujan yang lebih tinggi berbanding MBD (Jun-Sept) bagi ketiga-tiga lokasi dengan purata jumlah hujan 7.5 mm (Kota Bharu), 18.5 mm (Kuantan) dan 14.4 mm (Mersing). Manakala, MBD (Jun-Sept) menerima jumlah hujan dengan purata 5.9 mm (Kota Bharu), 7.3 mm (Kuantan) dan 6.5 mm (Mersing). Disebabkan kandungan hujan yang lebih tinggi, penyingkiran  $^{210}Pb$  daripada udara juga adalah tinggi semasa MTL berbanding MBD (Wan et al. 2008) menyebabkan aktiviti  $^{210}Pb$  lebih rendah pada hujung tahun di setiap lokasi pensampelan. Rajah 5 menunjukkan perubahan aktiviti  $^{210}Pb$  dengan suhu, jumlah hujan dan kepekatan  $PM_{10}$  mengikut lokasi dan musim. Variasi aktiviti  $^{210}Pb$  jelas menunjukkan purata yang lebih tinggi di Kota Bharu ( $0.70$   $mBq/m^3$ ) berbanding Mersing ( $0.47$   $mBq/m^3$ ) dan Kuantan ( $0.45$   $mBq/m^3$ ) semasa MTL. Ini berikutan kandungan hujan yang sedikit di stesen Kota Bharu berbanding Mersing dan Kuantan, Sekali gus membuktikan teori kesan

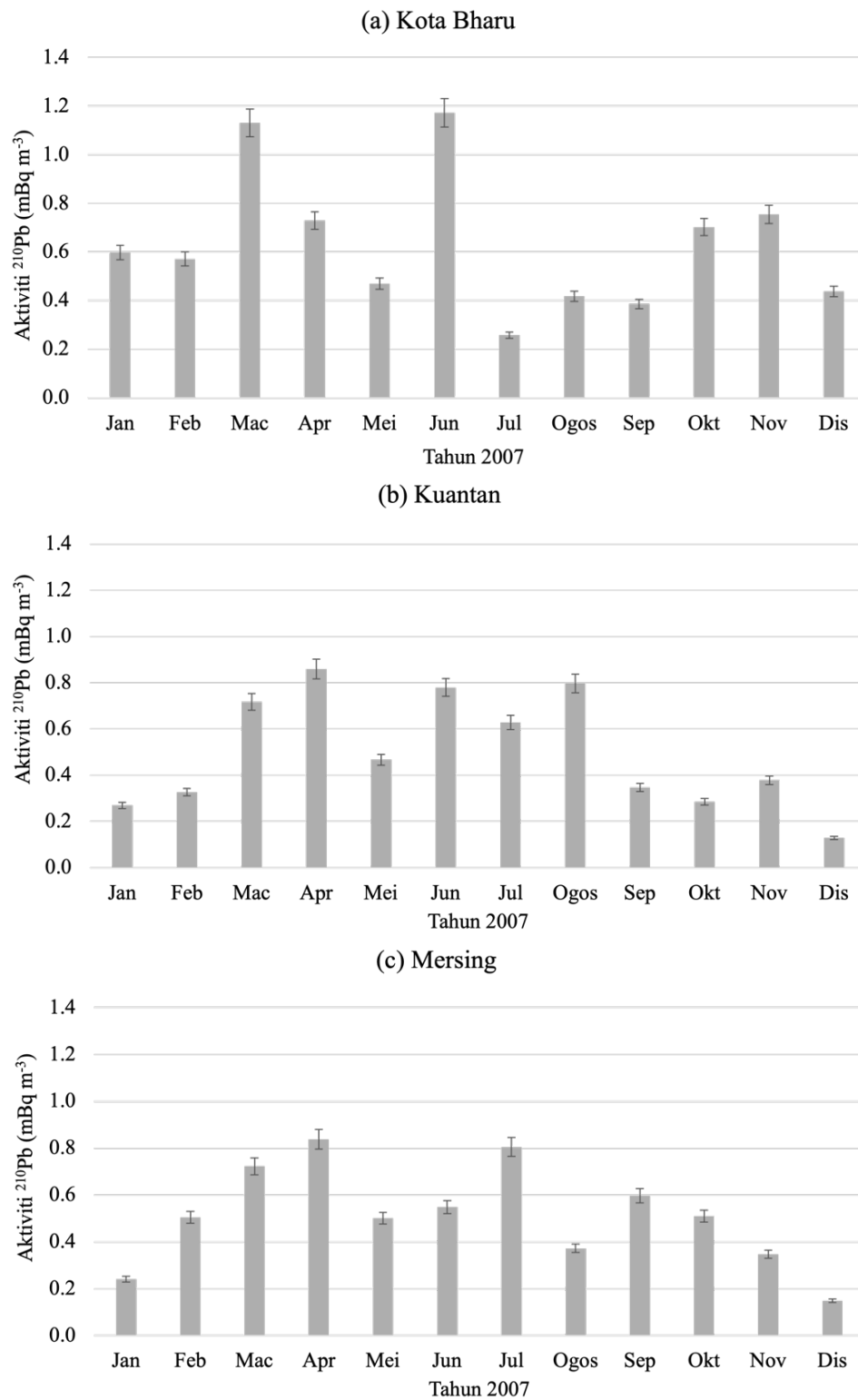
pencairan hujan yang dicadangkan oleh McNeary dan Baskaran (2003). Keadaan ini membawa korelasi negatif antara aktiviti  $^{210}Pb$  dan jumlah hujan harian.

Menurut Shaharuddin dan Noorazuan (2006), keadaan cuaca yang lebih kering pada musim basah adalah kerana purata jumlah hujan yang lebih rendah disebabkan oleh kehadiran hujan renyai-renyai dalam tempoh yang pendek. Keadaan ini memberi pengaruh kepada kawasan selatan ASEAN seperti di Semenanjung Malaysia. Julat hujan yang diterima di kawasan ini kebiasaannya berada di bawah paras normal (dalam julat 50% daripada normal). Manakala pada musim kering, zarah jerebu diangkut oleh angin dari jarak yang jauh merentasi Selat Melaka menerusi kejadian kebakaran hutan di Indonesia (Keywood et al. 2003). Keadaan pada musim ini menjadi lebih buruk dengan kehadiran fenomena El Niño terutamanya dengan kewujudan kandungan bahan pencemar daripada kawasan sekitar (Juneng et al. 2009). Fenomena El Niño biasa dikaitkan dengan peningkatan suhu yang lebih tinggi daripada keadaan normal dan kekurangan hujan menyebabkan kawasan setempat lebih kering. Kekurangan jumlah hujan membawa kepada peningkatan dan pengumpulan bahan terampai dan juga bahan pencemar dalam atmosfera (Kasoar et al. 2023; Yang et al. 2022).

Berdasarkan kajian lepas yang ditunjukkan dalam Jadual 5,  $PM_{10}$  di kawasan pesisir pantai di benua Asia dan Eropah mempunyai aktiviti  $^{210}Pb$   $\sim 0.1-3.0$   $mBq/m^3$ . Kawasan kajian ini mempunyai purata aktiviti  $^{210}Pb$  yang lebih rendah berbanding kawasan pesisir pantai Asia yang lain dan menyamai kawasan pesisir pantai Laut Mediterranean dan Lautan Atlantik yang direkodkan dari tahun 2004 hingga 2012 (Gordo et al. 2015). Secara umumnya, kedua-dua kawasan ini terletak di kawasan yang beriklim sederhana (terletak di  $30^{\circ}U - 45^{\circ}U$  dan kehadiran kerpasan sepanjang tahun dengan perubahan suhu setempat yang signifikan semasa musim sejuk dan panas) dengan kehadiran musim basah pada Oktober – April dan musim kering pada Mei – September. Dua musim utama di kawasan ini juga berlaku pada tempoh masa yang sama dengan Malaysia, lalu menyebabkan variasi bulanan aktiviti  $^{210}Pb$  yang direkodkan di kawasan ini juga menyerupai data kajian di Malaysia. Aktiviti  $^{210}Pb$  yang rendah di rantau ini adalah kerana sumber  $PM_{10}$  dibawa oleh jisim udara marin, yang kebiasaannya membawa aktiviti  $^{226}Ra$  yang rendah (Deng et al. 2020).

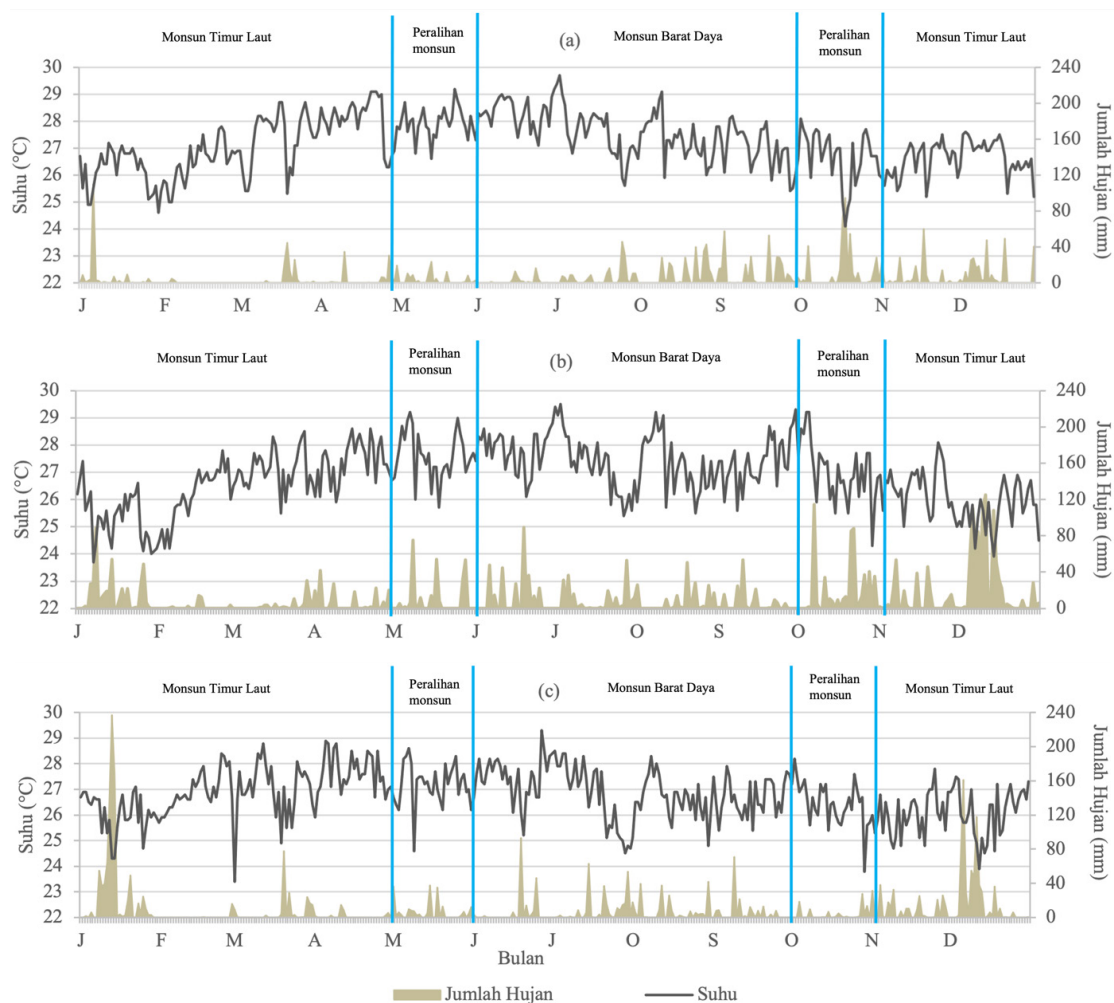
#### PENGARUH FAKTOR METEOROLOGI KEPADA TABURAN AKTIVITI $^{210}Pb$ DALAM $PM_{10}$

Jadual 6 menunjukkan analisis korelasi Pearson antara aktiviti  $^{210}Pb$  dan data meteorologi iaitu suhu, jumlah hujan harian dan kepekatan  $PM_{10}$ . Data yang diperoleh menunjukkan hubungan yang signifikan antara aktiviti  $^{210}Pb$  dengan suhu dan jumlah hujan harian ( $p < 0.05$ ). Suhu memberikan korelasi positif ( $r = 0.56$ ;  $p = 0.018$ )



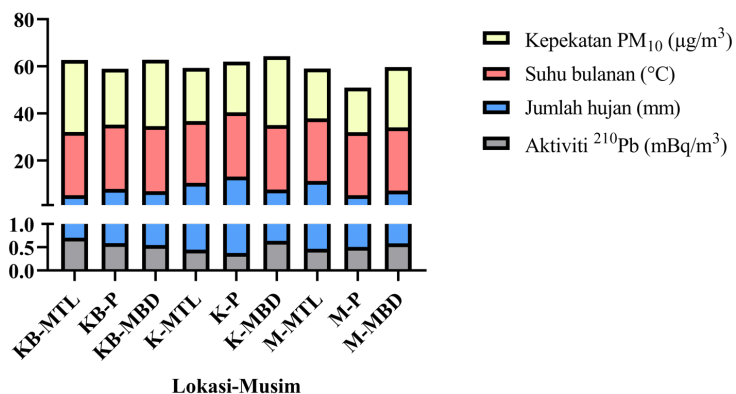
RAJAH 3. Aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam  $\text{PM}_{10}$  sepanjang tahun 2007 di stesen meteorologi: (a) Kota Bharu, (b) Kuantan dan (c) Mersing





Sumber: Jabatan Meteorologi Malaysia

RAJAH 4. Purata suhu dan jumlah hujan harian sepanjang tahun 2007 di stesen: (a) Kota Bharu, (b) Kuantan dan (c) Mersing



RAJAH 5. Imej perbandingan antara purata kandungan <sup>210</sup>Pb, jumlah hujan, kepekatan PM<sub>10</sub> dan suhu bulanan mengikut musim utama di Semenanjung Malaysia. Musim ditandakan dengan: (1) Nama stesen: KB (Kota Bharu), K (Kuantan), M (Mersing); dan (2) musim monsun: -MTL (Timur Laut), -MBD (Barat Daya), -P (peralihan monsun)

JADUAL 5. Rekod aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di benua Asia dan Eropah daripada pelbagai kajian yang lepas

Lokasi	Tahun	Perihal kawasan	Aktiviti $^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq m}^3$ )	Purata Aktiviti $^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq m}^3$ )	Rujukan
Mangalore, India	2014-2017	Pesisir pantai Laut	0.13 - 3.4	$0.9 \pm 0.72$	Mohan et al. (2018)
Kaiga, India	2014-2018	Arab	0.3 - 3.4	$1.0 \pm 0.73$	
Estonia		Loji kuasa syal minyak	5000 - 7000	t.b.	Vaasma et al. (2019)
Northern Poland	1998-2018		17 - 1490 *	t.b.	Zalewska, Biernacik & Marosz (2021)
Málaga, Spain	2009-2012	Pesisir pantai Mediterranean	0.1-2.04	$0.5 \pm 0.3$	Gordo et al. (2015)
Shanghai, China	2016-2017	Kawasan bandar mega	0.29 - 6.10	$2.07 \pm 1.28$	Deng et al. (2020)
Huelva, Semenanjung Iberia	2004-2011	Pesisir pantai barat daya Eropah	0.06 - 2.27	$0.57 \pm 0.04$	Lozano et al. (2012)
Premis KISR, Teluk Kuwait	2018-2019	Pesisir pantai teluk Kuwait	0.5 - 1.5	t.b.	Aba et al. (2020)
Qingdao, China	2001-2002	Bandar di pesisir pantai	0.15 - 6.63	$0.93 \pm 0.21$	Modibo et al. (2021)
Xiamen, China	2013 - 2015	Bandar di pesisir pantai	0.17 - 3.31	$1.26 \pm 0.78$	Huang, Bao & Yu (2019)
Rokkasho, Jepun	2000-2005	Pesisir pantai, lokasi loji pemprosesan semula nuklear	0.18 - 2.17	1.01	Akata et al. (2008)
Okinawa, Jepun	2001-2005	Pulau	0.1 - 1.52	0.64	Akata et al. (2008)
Perairan Malaysia	Jun - Ogos 2009	$\text{PM}_{10}$ marin	0.18 - 2.32	$0.91 \pm 0.27$	Sabuti & Mohamed (2018)
Pantai Timur Semenanjung Malaysia	Jan - Dis 2007	Pesisir pantai	0.13 - 1.17	$0.55 \pm 0.08$	Kajian ini
Purata nilai aktiviti $^{210}\text{Pb}$ dunia				0.50	UNSCEAR (2000)

\* unit:  $\mu\text{Bq/m}^3$ ; t.b.: tidak berkaitan/nilai tidak disertakan

JADUAL 6. Pekali korelasi Pearson di ketiga-tiga lokasi Pantai Timur Semenanjung Malaysia

Pemboleh ubah	Aktiviti $^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq/m}^3$ )	Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Jumlah hujan (mm)
Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.56	-	
Jumlah hujan (mm)	-0.55	-0.51	-
Kepekatan $\text{PM}_{10}$ ( $\mu\text{g/m}^3$ )	0.07	0.12	-0.30

\*pekali korelasi diukur dengan aras bererti  $p < 0.05$

dan jumlah hujan harian memberikan korelasi negatif yang sederhana ( $r = -0.55$ ;  $p = 0.06$ ) dengan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam atmosfera. Korelasi positif yang diperoleh antara parameter suhu dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  membuktikan suhu yang tinggi mampu membebaskan  $^{222}\text{Rn}$  keluar dari daratan dan memasuki ruangan atmosfera, disebabkan oleh 99% daripada kandungan  $^{222}\text{Rn}$  adalah berasal daripada pasir dan batuan di atas permukaan Bumi (Sykora & Froehlich 2010). Menurut Hirao, Yamazawa dan Moriizumi (2010), suhu setempat yang tinggi akan meningkatkan suhu tanah dan daratan sekali gus memangkin pelepasan gas  $^{222}\text{Rn}$  yang terkandung di kawasan daratan. Kajian ini juga menunjukkan bahawa variasi suhu tanah memberi kesan langsung terhadap fluks  $^{222}\text{Rn}$  di dalam atmosfera yang mana keadaan setempat yang lebih panas menyebabkan pelepasan  $^{222}\text{Rn}$  yang lebih tinggi. Gas  $^{222}\text{Rn}$  yang berada dalam ruang atmosfera akan memancarkan radiasi dan mengalami penyepaian sebelum berubah kepada beberapa nuklid yang berlainan dan akhirnya kepada  $^{210}\text{Pb}$ .  $^{210}\text{Pb}$  akan kekal di dalam atmosfera atau akan termendap di daratan melalui pemendapan basah atau kering.

Aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dan kepekatan  $\text{PM}_{10}$  menunjukkan tiada sebarang hubungan ( $r = 0.07$ ), sekali gus membuktikan bahawa kepekatan  $\text{PM}_{10}$  dalam atmosfera di pesisir pantai tidak memberi kesan terhadap perubahan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$ . Keputusan ini adalah bertentangan dengan kebanyakan kajian yang lepas (Bikkina, Sarin & Chinni 2015; Huang, Bao & Yu 2019; Mohan et al. 2018; Wang et al. 2023b; Zalewska, Biernacik & Marosz 2021). Walau bagaimanapun, kajian oleh Sabuti dan Mohamed (2016) menyatakan bahawa terdapat hubungan yang kompleks antara kepekatan  $\text{PM}_{10}$  dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam atmosfera pesisir pantai di Mersing, Johor (kawasan selatan pantai timur Semenanjung Malaysia).

Terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi ketiadaan hubungan antara aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dan kepekatan  $\text{PM}_{10}$  di kawasan kajian. Pertama,  $^{210}\text{Pb}$  lebih mudah dikesan melekat pada bahan terampai yang bersaiz lebih kecil daripada  $1\ \mu\text{m}$  (Paatero et al. 2017). Ini menjadikan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  rendah apabila dianalisis pada sampel  $\text{PM}_{10}$  yang mempunyai saiz  $2.5 - 10\ \mu\text{m}$ . Kedua, sumber bahan terampai dalam atmosfera juga memainkan peranan penting terhadap aktiviti  $^{210}\text{Pb}$ . Telah diketahui bahawa  $^{210}\text{Pb}$  terhasil daripada pereputan gas  $^{222}\text{Rn}$  sebelum tergarut pada bahan terampai dalam atmosfera. Menurut Nazaroff (1992), fluks global  $^{222}\text{Rn}$  dari kawasan daratan adalah  $1300 - 1800\ \text{Bq/m}^3/\text{hari}$ , tetapi di kawasan pesisir pantai atau maritim hanya mencatatkan  $2 - 21\ \text{Bq/m}^3/\text{hari}$ . Ini menjadikan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  adalah lebih rendah di kawasan pesisir pantai dan tidak mempunyai hubungan dengan  $\text{PM}_{10}$ .

Analisis regresi linear juga membuktikan penolakan hipotesis nol ( $H_0$ ;  $t = 13.175$ ), selari dengan jangkaan dalam kajian ini yang mana terdapat hubungan yang bererti antara

faktor meteorologi dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam  $\text{PM}_{10}$  di pantai timur Semenanjung Malaysia. Parameter suhu dan jumlah hujan harian jelas mempengaruhi aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di dalam atmosfera ( $p < 0.05$ ) dan yang sebaliknya oleh kepekatan  $\text{PM}_{10}$  ( $p > 0.05$ ). Antara kedua-dua parameter, jumlah hujan harian adalah faktor utama yang paling signifikan ( $p = 0.017$ ) berbanding suhu ( $p = 0.06$ ) terhadap aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di dalam atmosfera.

Aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam  $\text{PM}_{10}$  berkurangan selari dengan jumlah hujan yang bertambah seperti yang dilaporkan oleh beberapa kajian lain (Akata et al. 2008; Deng et al. 2020; Gordo et al. 2015; Modibo et al. 2021; Mohan et al. 2018; Sabuti & Mohamed 2018). Menurut Chen, Luo dan Huang (2016), jumlah hujan yang tinggi akan menggarut lebih banyak zarah  $^{210}\text{Pb}$ , menyebabkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di dalam atmosfera adalah rendah. Berbeza dengan keputusan oleh Huang, Bao dan Yu (2019), walaupun mereka merekodkan hubungan negatif antara jumlah hujan dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$ , namun kajian tersebut membuktikan faktor suhu sekitaran adalah lebih berpengaruh terhadap aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam atmosfera.

#### KESIMPULAN

Aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  direkodkan maksimum semasa Monsun Barat Daya yang dicirikan dengan suhu persekitaran yang tinggi dan jumlah hujan yang rendah. Manakala, aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  minimum sepanjang tempoh awal Monsun Timur Laut dengan suhu sekitaran yang rendah dan jumlah hujan yang tinggi. Melalui analisis korelasi Pearson dan analisis regresi linear, parameter suhu dan jumlah hujan harian memberikan pengaruh yang sama penting terhadap perubahan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di dalam  $\text{PM}_{10}$  pada tahun 2007. Suhu dan jumlah hujan harian memberikan korelasi sederhana terhadap perubahan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$ . Analisis regresi juga membuktikan bahawa jumlah hujan harian adalah parameter yang paling berpengaruh terhadap aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  berbanding suhu persekitaran. Manakala, kepekatan  $\text{PM}_{10}$  tidak membawa sebarang pengaruh kepada perubahan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam atmosfera.

Data yang diperoleh dalam kajian ini menunjukkan terdapat hubungan antara faktor meteorologi setempat dan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  di dalam  $\text{PM}_{10}$  di kawasan pantai timur Semenanjung Malaysia. Laporan mengenai aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam  $\text{PM}_{10}$  di kawasan Pantai timur Semenanjung Malaysia mampu memberi gambaran terhadap sumber pencemaran yang dibawa ke kawasan ini, termasuk pembakaran bahan biojisim dan pengangkutan habuk daratan atau aerosol maritim secara jarak jauh. Pemahaman mengenai kedinamikan ini amat penting untuk menilai kualiti udara dan kesan aktiviti antropogen di rantau ini yang mudah mengalami pencemaran. Oleh itu, dengan merekodkan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dalam  $\text{PM}_{10}$ , ia dapat membantu pengurusan alam sekitar dan penyelidikan iklim di Asia Tenggara.

## PENGHARGAAN

Penulis ingin berterima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia atas sumbangan geran FRGS (Skim Geran Penyelidikan Fundamental – kod geran: FRGS/1/2019/WAB09/UKM/01/1). Terima kasih juga kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas geran DPK-2017-010 serta First Institute of Oceanography (FIO), State Oceanic Administration (SOA), China bagi geran ST-2017-010 untuk kajian ini. Jutaan terima kasih juga atas kerjasama daripada pihak Jabatan Meteorologi Malaysia dalam menyediakan sampel mentah dan data sekunder. Penghargaan juga kepada ahli-ahli makmal Oseanografi Kimia, Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, UKM yang banyak membantu dalam urusan kerja makmal.

## RUJUKAN

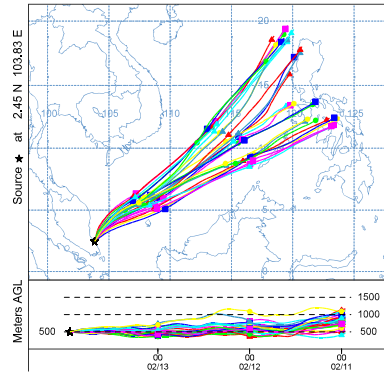
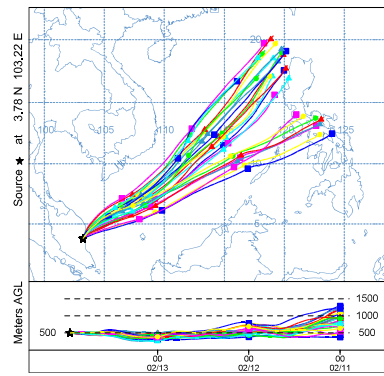
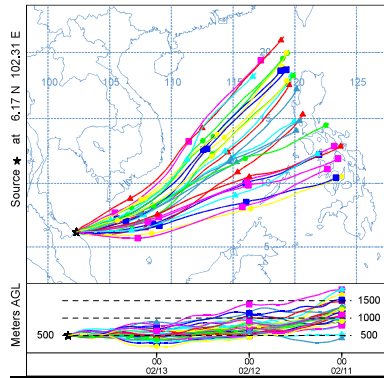
- Aba, A., Ismaeel, A., Al-Boloushi, O., Al-Shammari, H., Al-Boloushi, A. & Malak, M. 2020. Atmospheric residence times and excess of unsupported  $^{210}\text{Po}$  in aerosol samples from the Kuwait Bay - northern gulf. *Chemosphere* 261: 127690.
- Akata, N., Kawabata, H., Hasegawa, H., Kondo, K., Sato, T., Chickuchi, Y., Kondo, K., Hisamatsu, S. & Inaba, J. 2008. Total deposition velocities and scavenging ratios of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  at Rokkasho, Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 277: 347-355.
- Anwar, A., Juneng, L., Othman, M.R. & Latif, M.T. 2010. Correlation between hotspots and air quality in Pekanbaru, Riau, Indonesia in 2006-2007. *Sains Malaysiana* 39(2): 169-174.
- Basile, S., Burlon, R. & Tomarchio, E. 2019. Analysis of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentration and  $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$  activity ratio in ground level air in Palermo (Italy). *Radiation Effects and Defects in Solids* 174(11-12): 998-1007.
- Biernacik, D. & Zalewska, T. 2023.  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , airborne particulate matter and  $\text{PM}_{10}$  concentrations in relation to meteorological conditions in Southern Poland in 1998-2016. *Journal of Environmental Radioactivity* 259-260: 107122.
- Bikkina, S., Sarin, M.M. & Chinni, V. 2015. Atmospheric  $^{210}\text{Pb}$  and anthropogenic trace metals in the continental outflow to the Bay of Bengal. *Atmospheric Environment* 122: 737-747.
- Cai, Y., Yamazawa, H. & Iimoto, T. 2023.  $^{210}\text{Pb}$  deposition distribution in the northern hemisphere based on a long-range atmospheric transport and deposition model calculation. *Atmosphere* 14(9): 1329.
- Chen, J., Luo, S. & Huang, Y. 2016. Scavenging and fractionation of particle-reactive radioisotopes  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 188: 208-223.
- Choudhary, N., Srivastava, P., Dutta, M., Mukherjee, S., Rai, A., Gupta, S., Kuniyal, J.C., Lata, R., Chatterjee, A., Naja, M., Mandal, T.K. & Sharma, S.K. 2022. Wintertime variation in carbonaceous components of  $\text{PM}_{10}$  in the high altitudes of Himalayas. *Environmental Sciences Proceedings* 19(1): 16.
- Cruz, F.T., Narisma, G.T., Villafuerte, M.Q., Cheng Chua, K.U. & Olaguera, L.M. 2013. A climatological analysis of the southwest monsoon rainfall in the Philippines. *Atmospheric Research* 122: 609-616.
- Cuesta, E., Barba-Lobo, A., Lozano, R.L., San Miguel, E.G., Mosqueda, F. & Bolívar, J.P. 2022. A comparative study of alternative methods for  $^{210}\text{Pb}$  determination in environmental samples. *Radiation Physics and Chemistry* 191: 109840.
- Deng, B., Zhong, Q., Wang, Q., Du, J. & Zhang, X. 2020. Temporal variation of  $^{210}\text{Pb}$  concentration in the urban aerosols of Shanghai, China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 323(3): 1135-1143.
- Długosz-Lisiecka, M. 2021. Aerosol removal coefficients based on  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , and  $^{210}\text{Po}$  radionuclides in the urban atmosphere. *Journal of Atmospheric Chemistry* 78(3): 209-218.
- Gadgil, S., Francis, P.A., Rajendran, K., Nanjundiah, R.S. & Rao, S.A. 2021. Role of land-ocean contrast in the Indian summer monsoon rainfall. Dlm. *The Multiscale Global Monsoon System*, disunting oleh Chang, C-P., Ha, K-J., Johnson, R.H., Kim, D., Lau, G.N.C. & Wang, B. World Scientific. hlm. 3-12.
- Gordo, E., Duenas, C., Fernandez, M.C., Liger, E. & Canete, S. 2015. Behaviour of ambient concentrations of natural radionuclides  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$  in the Mediterranean coastal city of Malaga (Spain). *Environmental Science and Pollution Research* 22: 7653-7664.
- Hanafi, N.H., Hassim, M.H., Noor, Z.Z., Ng, D.K.S., Nor Helmi, N.H. & Aris, N.M. 2019. Analysis of transported pollution and haze-related diseases via HYSPLIT trajectory modelling in the urbanized area of Johor, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Melaka: Institute of Physics Publishing.
- Hirao, S., Yamazawa, H. & Moriizumi, J. 2010. Estimation of the global  $^{222}\text{Rn}$  flux density from the Earth's surface. *Japanese Journal of Health Physics* 45(2): 161-171.
- Huang, D., Bao, H. & Yu, T. 2019. Temporal variations in radionuclide activity ( $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ) in surface aerosols at a coastal site in southeastern China. *Aerosol and Air Quality Research* 19(9): 1969-1979.

- Islam, Md.F., Majumder, S.S., Mamun, A.M, Khan, Md.B., Rahman, M.A., Salam, A., Islam, Md.F., Majumder, S.S., Mamun, A. Al, Khan, Md.B., Rahman, M.A. & Salam, A. 2015. Trace metals concentrations at the atmosphere particulate matters in the Southeast Asian mega city (Dhaka, Bangladesh). *Open Journal of Air Pollution* 4(2): 86-98.
- Jabatan Meteorologi Malaysia. 2019. Annual Report 2019. Petaling Jaya.
- Jaén, C., Titos, G., Castillo, S., Casans, A., Rejano, F., Cazorla, A., Herrero, J., Alados-Arboledas, L., Grimalt, J.O. & van Drooge, B.L. 2023. Diurnal source apportionment of organic and inorganic atmospheric particulate matter at a high-altitude mountain site under summer conditions (Sierra Nevada; Spain). *Science of the Total Environment* 905: 167178.
- Jia, G., Belli, M., Blasi, M., Marchetti, A., Rosamilia, S. & Sansone, U. 2001. Determination of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in mineral and biological environmental samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 247(3): 491-499.
- Juneng, L., Latif, M.T., Tangang, F.T. & Mansor, H. 2009. Spatio-temporal characteristics of  $\text{PM}_{10}$  concentration across Malaysia. *Atmospheric Environment* 43(30): 4584-4594.
- Kasoar, M., Bayley, C., Wells, C. & Voulgarakis, A. 2023. A negative feedback on El Niño events caused by extreme fire activity in equatorial Asia. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2770952/v1>
- Kassem, Kh.O. 2014. Long range transport contribution to  $\text{PM}_{10}$  concentrations in a subtropical city (Qena/Egypt). *World Environment* 4(1): 1-13.
- Keywood, M.D., Ayers, G.P., Gras, J.L., Boers, R. & Leong, C.P. 2003. Haze in the Klang Valley of Malaysia. *Atmospheric Chemistry and Physics* 3(3): 591-605.
- Khairul Anuar, N.A.A., Banu Samsudin, H. & Majid, N. 2023. Impact of haze event on daily admission of respiratory system patients in Peninsular Malaysia. *Sains Malaysiana* 52(10): 2985-2997.
- Ledoux, F., Roche, C., Delmaire, G., Roussel, G., Favez, O., Fadel, M. & Courcot, D. 2023. Measurement report: A 1-year study to estimate maritime contributions to  $\text{PM}_{10}$  in a coastal area in northern France. *Atmospheric Chemistry and Physics* 23(15): 8607-8622.
- Loo, Y.Y., Billa, L. & Singh, A. 2015. Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers* 6(6): 817-823.
- Lozano, R., Hernandez-Ceballos, M., San Miguel, E., Adame, J. & Bolivar, J. 2012. Meteorological factors influencing the  $^{7}\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentration in surface air from the southwestern Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment* 63: 168-178.
- Ma'amor, A., Noor, N.M., Jafri, I.A.M., Addiena, N.A., Saufie, A.Z.U., Amin, N.A., Boboc, M. & Deak, G. 2023. Spatial and temporal variation of particulate matter ( $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$ ) and its health effects during the haze event in Malaysia. *Journal of Atmospheric Science Research* 6(4): 27-48.
- McNeary, D. & Baskaran, M. 2003. Depositional characteristics of  $^{7}\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in southeastern Michigan. *Journal of Geophysical Research* 108: 4210.
- Modibo, O.B., Tokonami, S., Hosoda, M., Tamakuma, Y., Jun, H., Hegedus, M., Nugraha, E.D., Saidou, T.H., Akata, N., Kanai, Y., Yanagisawa, F. & Zhang, R. 2021.  $^{210}\text{Pb}$  and major ion concentrations in aerosols collected in Qingdao, a seaside area of China. *Radiation Environment and Medicine* 10(1): 18-25.
- Mohan, M.P., D'Souza, R.S., Rashmi Nayak, S., Kamath, S.S., Shetty, T., Sudeep Kumara, K., Yashodhara, I., Mayya, Y.S. & Karunakara, N. 2018. A study of temporal variations of  $^{7}\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations and their correlations with rainfall and other parameters in the South West Coast of India. *Journal of Environmental Radioactivity* 192: 194-207.
- Nazaroff, W.W. 1992. Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics* 30(2): 137-160.
- Paatero, J., Ioannidou, A., Ikonen, J. & Lehto, J. 2017. Aerosol particle size distribution of atmospheric lead-210 in northern Finland. *Journal of Environmental Radioactivity* 172: 10-14.
- Pani, S.K., Panda, S.K. & Baliarsingh, S.K. 2020. Influence of meteorological parameters on the vertical distribution of particulate matter ( $\text{PM}_{10}$ ) in a coastal urban environment. *Aerosol and Air Quality* 20(4): 906-920.
- Sabuti, A.A. 2014. Perubahan aktiviti  $^{210}\text{Pb}$  dan  $^{210}\text{Po}$  dalam atmosfera - permukaan laut di Malaysia: Suatu penjelasan mengenai status struktur biogeokimia dan produktiviti marin. Tesis PhD, Fakulti Sains dan Teknologi. Bangi: Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Sabuti, A.A. & Mohamed, C.A.R. 2018. Correlation between total suspended particles and natural radionuclide in Malaysia maritime air during haze event in June-July 2009. *Journal Clean WAS* 2(1): 1-5.
- Sabuti, A.A. & Mohamed, C.A.R. 2016. Impact of northern and southern air mass transport on the temporal distribution of atmospheric  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in the east coast of Johor, Malaysia. *Environmental Science and Pollution Research* 23(18): 18451-18465.
- Shaharuddin, A. & Noorazuan, M.H. 2006. Kebakaran hutan dan isu pencemaran udara di Malaysia: kes jerebu pada Ogos 2005. *Jurnal e-Bangi* 1(1): 1-19.
- Shen, Z., Cao, J., Arimoto, R., Zhang, R., Li, X. & Zhang, D. 2016. Effect of altitude and season on particle size distribution in the free troposphere-stratosphere exchange of aerosols over Northeast Asia. *Atmospheric Environment* 140: 309-319.

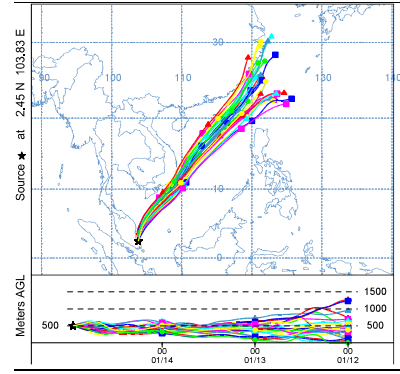
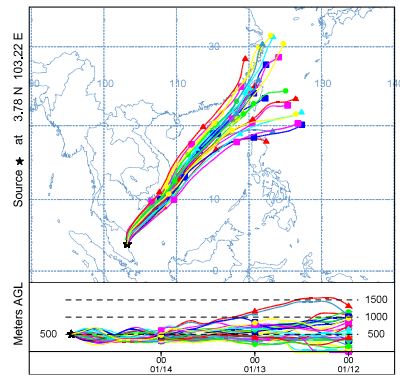
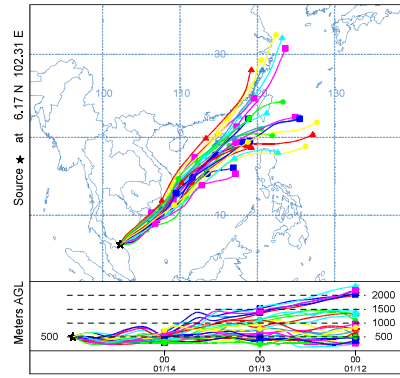
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. & Ngan, F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modelling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12): 2059-2077.
- Sykora, I. & Froehlich, K. 2010. Radionuclide as tracers of atmospheric processes. Dlm. *Environmental Radionuclides: Tracers and Timers of Terrestrial Processes*, disunting Froehlich, K.F. Oxford: Elsevier Science. hlm. 51-86.
- UNSCEAR. 2000. Annex B: Exposures from natural radiation sources. Dlm. *Sources & Effects of Ionizing Radiation*, hlm. 96-104. New York: UN Publications.
- Vaasma, T., Klisk, M., Leier, M., Suursoo, S., Jantsikene, A. & Putk, K. 2019. NORM-related industrial activities in Estonia - establishing national NORM inventory. *Journal of Sustainable Mining* 18: 86-93.
- Wan, G.J., Lee, H.N., Wan, E.Y., Wang, S.L., Yang, W., Wu, F.C., Chen, J.A. & Wang, C.S. 2008. Analyses of  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in surface air and in rain water at the central Guizhou, China. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology* 60B(1): 32-41.
- Wang, X., Gillies, J.A., Kohl, S., Furtak-Cole, E., Tupper, K.A. & Cardiel, D.A. 2023a. Quantifying the source attribution of  $\text{PM}_{10}$  measured downwind of the Oceano Dunes state vehicular recreation area. *Atmosphere* 14(4): 718.
- Wang, X., Zhou, J., Su, K., Du, J., Wei, L., Li, X., Du, J. & Lu, D. 2023b. Atmospheric radioactive nuclide deposition on the coast of the Maowei Sea, Northern Beibu Gulf, China. *Frontiers in Marine Science* 10: 1196906.
- Xin, Y., Wang, G. & Chen, L. 2016. Identification of long-range transport pathways and potential sources of  $\text{PM}_{10}$  in Tibetan Plateau uplift area: Case study of Xining, China in 2014. *Aerosol and Air Quality Research* 16(4): 1044-1054.
- Yamazawa, H., Cai, Y., Matsumoto, T., Moriizumi, J., Hasegawa, H. & Kawano, T. 2022. Long-range atmospheric transport of radon in East Asia and deposition of its progenies in Japan. *Radiation Protection Dosimetry* 198(13-15): 891-895.
- Yang, Y., Zeng, L., Wang, H., Wang, P. & Liao, H. 2022. Dust pollution in China affected by different spatial and temporal types of El Niño. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22(22): 14489-14502.
- Zalakeviciute, R., Alexandrino, K., Rybarczyk, Y., Debut, A., Vizuete, K. & Diaz, M. 2020. Seasonal variations in  $\text{PM}_{10}$  inorganic composition in the Andean city. *Scientific Reports* 10: 17049.
- Zalewska, T., Biernacik, D. & Marosz, M. 2021. Correlations between  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , dust and  $\text{PM}_{10}$  concentrations in relation to meteorological conditions in northern Poland in 1998–2018. *Journal of Environmental Radioactivity* 228: 106526.
- Zhang, F., Wang, J., Baskaran, M., Zhong, Q., Wang, Y., Paatero, J. & Du, J. 2021. A global dataset of atmospheric  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  measurements annual air concentration and depositional flux. *Earth System Science Data* 13(6): 2963-2994.
- Zhang, X., Zhang, M., Gong, S., Zhang, Y., Zhang, J. & Huo, L. 2020. Vertical distribution of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in the lower troposphere over Beijing-Tianjin Hebei region: Influences of meteorological factors and implications for pollution control. *Atmospheric Research* 239: 104869.

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

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 13 Feb  
07 GDAS Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 14 Jan  
07 GDAS Meteorological Data



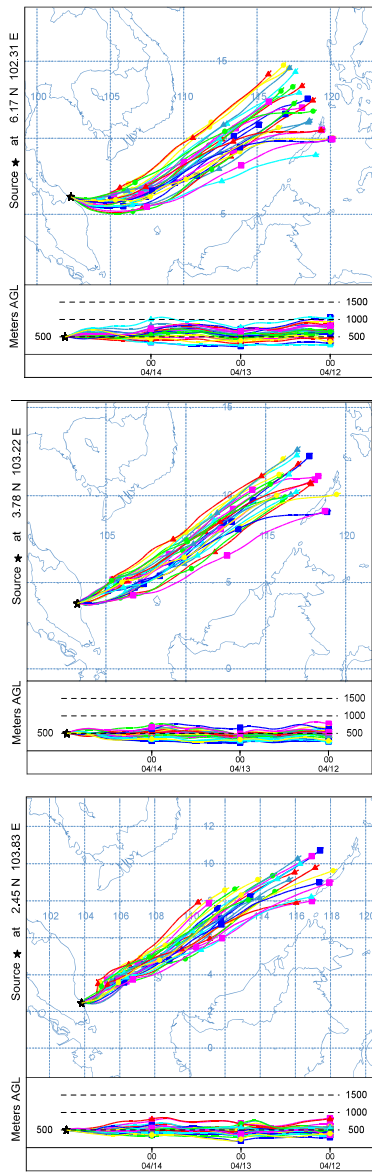
Tarikh

Kota Bharu

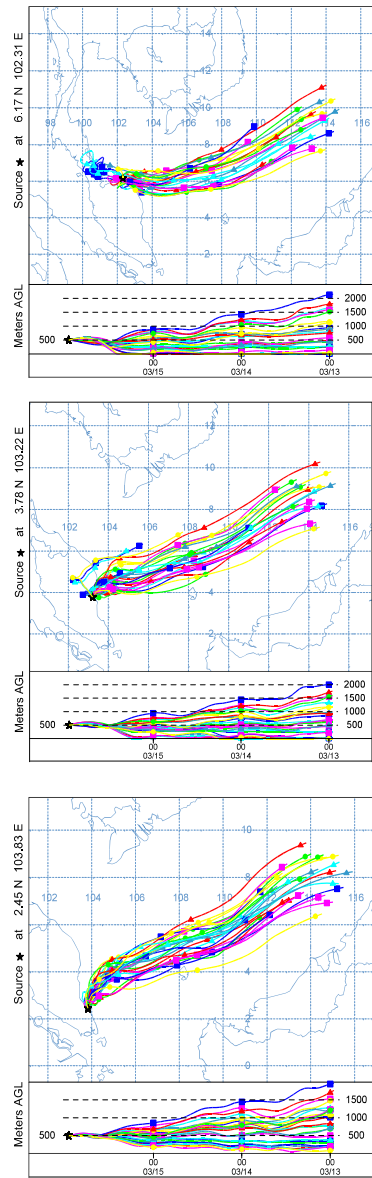
Kuantan

Mersing

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2300 UTC 14 Apr  
 07 GDAS Meteorological Data

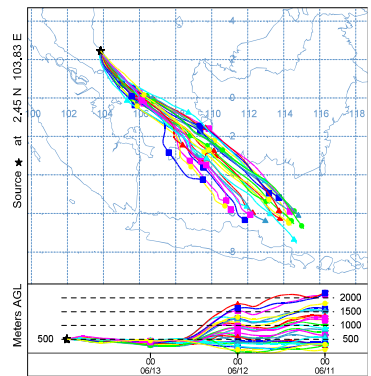
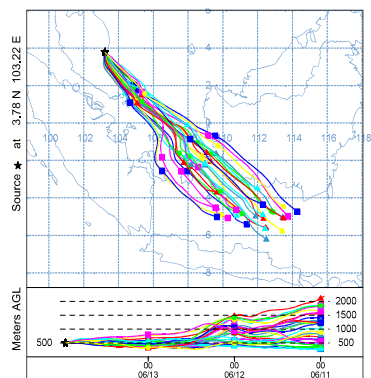
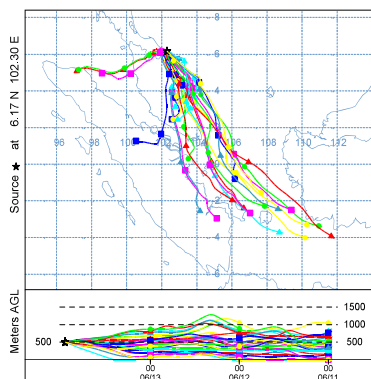


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2300 UTC 15 Mar 07  
 GDAS Meteorological Data

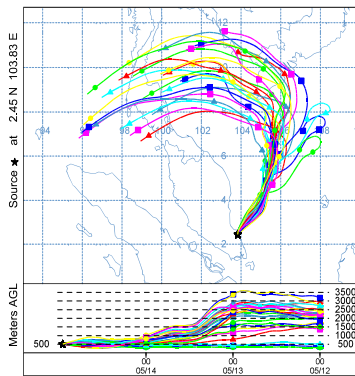
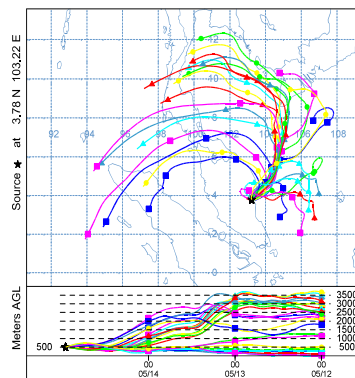
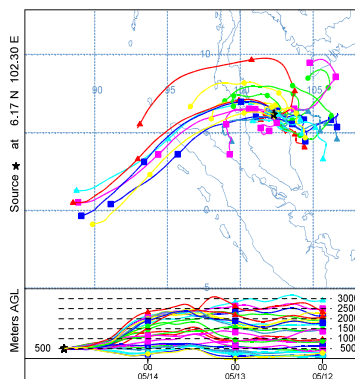




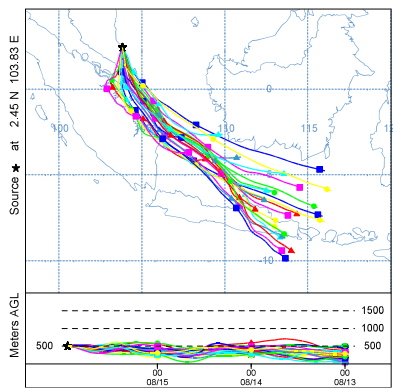
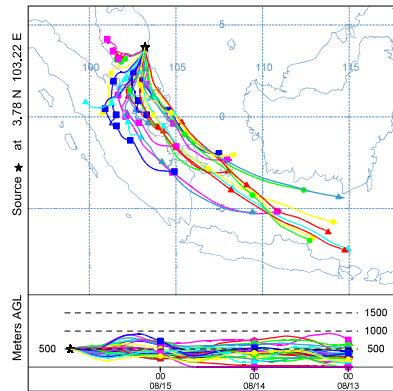
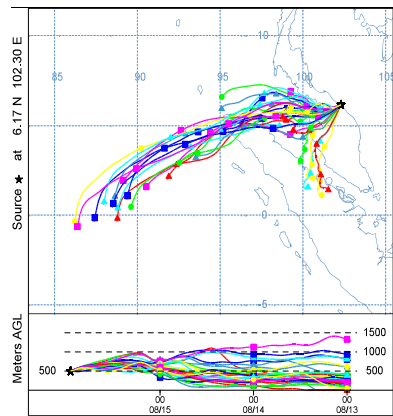
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 13 Jun  
07 GDAS Meteorological Data



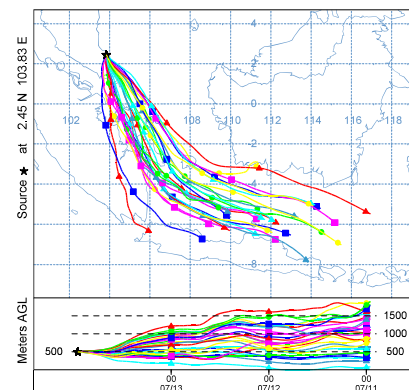
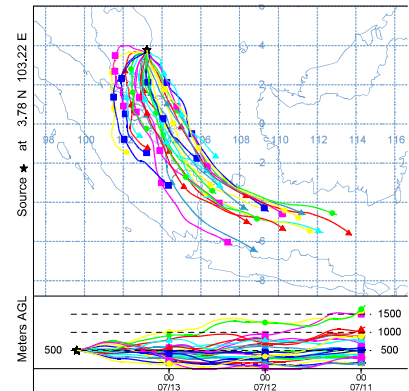
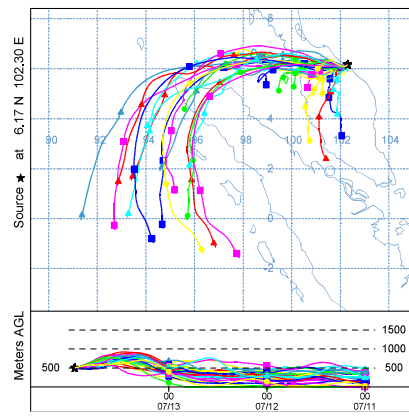
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 14 May 07  
GDAS Meteorological Data



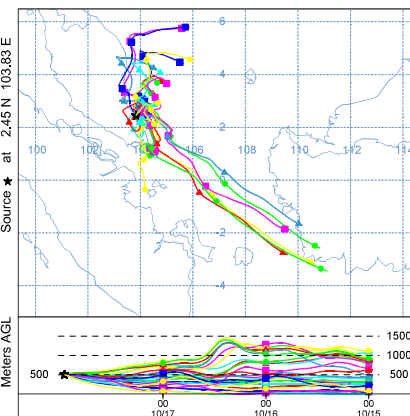
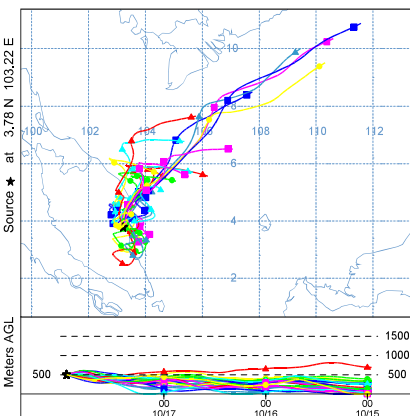
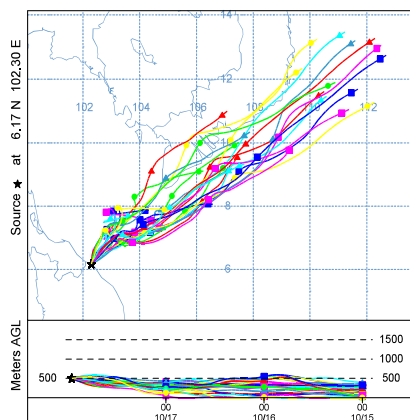
NOAA YSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 15  
Aug 07 GDAS Meteorological Data



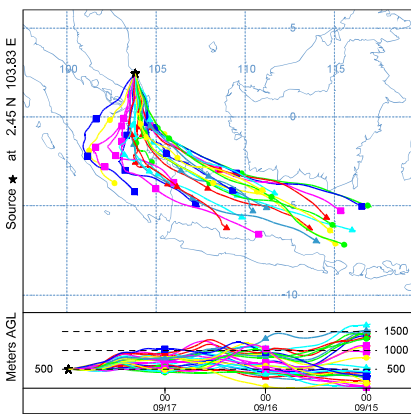
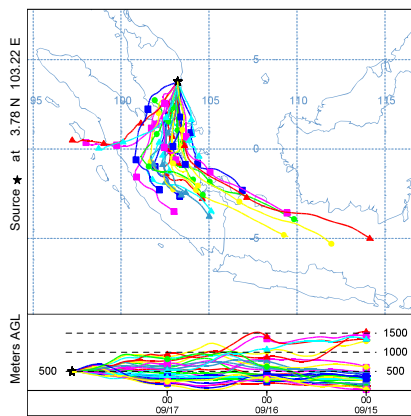
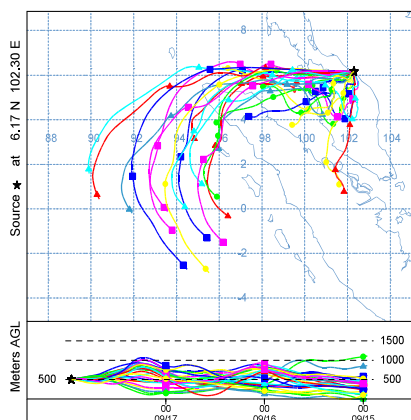
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 2300 UTC 13 Jul  
07 GDAS Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2300 UTC 17 Oct  
 07 GDAS Meteorological Data

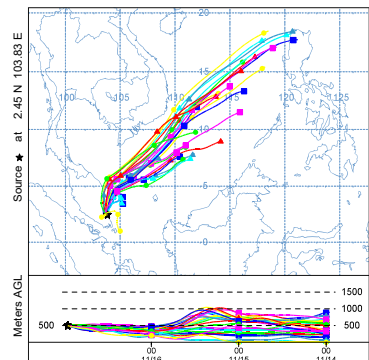
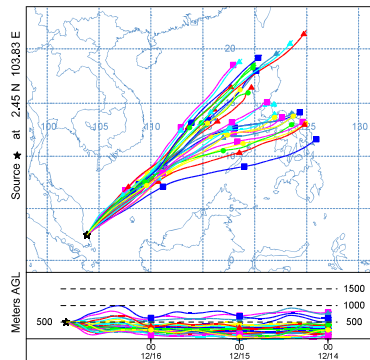
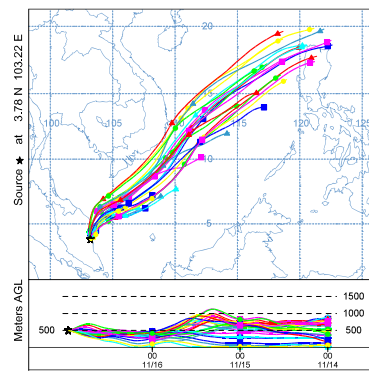
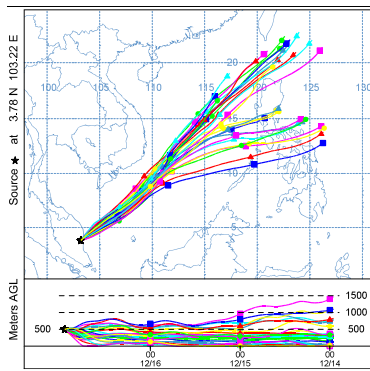
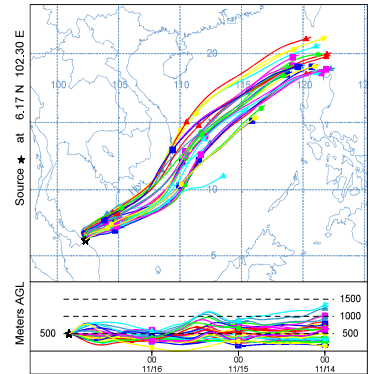
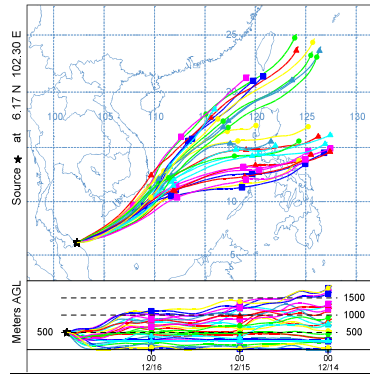


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2300 UTC 17 Sep 07  
 GDAS Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2300 UTC 16 Dec 07  
 GDAS Meteorological Data

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 2300 UTC 16 Nov  
 07 GDAS Meteorological Data



RAJAH S1. Imej trajektori unjuran kebelakang daripada model HYSPLIT di laman sesawang NOAA bagi penentuan asal dan arah pergerakan jisim angin ke kawasan pensampelan di pantai timur Semenanjung Malaysia pada tarikh pensampelan  $PM_{10}$ . Meter AGL merujuk kepada ketinggian atau altitud trajektori jisim angin, diukur dengan meter di atas paras tanah (AGL). Nilai altitud bagi setiap titik trajektori menunjukkan ketinggian jisim angin pada jam 12 pagi dalam tempoh 36 jam sebelum tiba ke kawasan pensampelan