

Perbezaan Impak Super El Niño terhadap Taburan Hujan di Asia Tenggara (Differences in the Impact of Super El Niño on Rainfall in Southeast Asia)

NOOR AMALINA BOKRI¹, ESTER SALIMUN^{1,2,*}, ABDUL AZIM AMIRUDIN¹, MUHAMAD ZUHAIRI¹, AFIQAH
BAHIRAH AYOUB¹ & NUR LIYANA ISMAIL¹

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

²Pusat Penyelidikan Ekosistem Marin (EKOMAR), Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Diserahkan: 28 Julai 2025/Diterima: 5 November 2025

ABSTRAK

Perbezaan keamatan El Niño *Southern Oscillations* (ENSO) akan menghasilkan kesan yang berbeza terhadap taburan hujan. Memahami perbezaan dalam mekanisme dan tele-hubungan antara kejadian yang berbeza adalah sangat penting untuk menganggarkan kesannya pada masa hadapan. Asia Tenggara (AT) dipilih sebagai lokasi kajian kerana ia terletak berhampiran dengan khatulistiwa dan sangat terdedah kepada kesan keragaman iklim. Nilai tambah kajian ini adalah meneliti perbezaan impak tele-hubungan terhadap taburan hujan semasa peristiwa super El Niño (1982/83, 1997/98 & 2015/16) di AT, sekali gus memberikan perspektif perbandingan yang sebelum ini kurang diberi perhatian dalam kajian terdahulu. Tiga tahun El Niño telah dipilih untuk kajian ini dan hasil daripada analisis menunjukkan bahawa kekuatan, corak dan jenis El Niño memainkan peranan dalam membentuk taburan hujan musiman di rantau ini melalui mekanisme tele-hubungan yang berbeza. Antara ketiga-tiga super El Niño tersebut, El Niño pada 1997/98 memberikan impak keadaan kering signifikan di AT terutamanya di kawasan selatan (Indonesia dan Filipina) semasa musim SON dengan -2 mm/hari (anomali piawai di bawah min). Keadaan pengeringan yang lebih ekstrem ini berkait rapat dengan kewujudan fasa puncak IOD positif yang kuat secara serentak berbanding dua super El Niño yang lain. Penggunaan data stesen dalam kajian lanjutan disarankan untuk meningkatkan ketepatan penilaian impak terhadap lokaliti di AT semasa fenomena super El Niño.

Kata kunci: Asia Tenggara; super El Niño; taburan hujan; tele-hubungan

ABSTRACT

The different intensities of El Niño Southern Oscillations (ENSO) will induce different impacts on the rainfall distribution. Understanding the differences in mechanisms and teleconnections between different events is crucial to estimating future impacts. Southeast Asia (SEA) is chosen as the study location as it lies near the equator, which is prone to face the impacts of climate variabilities. The added value of this research lies in examining the differential impacts of the super El Niño events (1982/83, 1997/98, and 2015/16) and their teleconnections on rainfall distribution across SEA, thereby addressing a comparative perspective that has been largely overlooked in previous studies. The results indicate that the strength, pattern, and type of El Niño shape the seasonal rainfall distribution in the region through distinct teleconnection mechanisms. Significant rainfall anomalies are detected across SEA especially over the southern part (Indonesia and Philippines) during the SON season for all three super El Niño events. Among them, the 1997/98 event exhibits the strongest negative precipitation anomalies, -2 mm/day (standardised anomaly below the mean). This pronounced drying can be attributed to the concurrent peak of a strong positive IOD phase. The use of station data in future studies is recommended to improve the accuracy of impact assessments on localities in SEA during super El Niño events.

Keywords: Precipitation; Southeast Asia; super El Niño; teleconnection

PENGENALAN

Rantau Asia Tenggara (AT) adalah cenderung untuk menerima impak dari pelbagai keragaman iklim berikutan kedudukannya ditengah-tengah dua buah lautan utama; Lautan Hindi (LH) dan Lautan Pasifik (LP). Lautan ini adalah pencetus kepada beberapa keragaman iklim seperti

El Niño-Southern Oscillations (ENSO), *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan *Madden-Julian Oscillation* (MJO). Kajian lepas mendapati kemunculan keragaman iklim ini secara individu ataupun gabungan mampu memberikan impak yang negatif terhadap rantauan ini (Amirudin et al. 2020; Juneng & Tangang 2005; Nguyen-Le, Ngo-Duc

& Matsumoto 2024; Salimun et al. 2014; Suhaila et al. 2010; Thirumalai et al. 2017). Terdapat dua jenis El Niño iaitu El Niño konvensional dan El Niño Modoki. El Niño konvensional dicirikan dengan pemanasan maksimum suhu permukaan laut anomali (SPLA) yang berlaku di timur LP (5°S - 5°U , 150°T - 90°B), manakala pemanasan maksimum SPLA di tengah LP (5°S - 5°U , 160°T - 150°B) pula merupakan ciri bagi El Niño Modoki (Ashok et al. 2007; Fu, Diaz & Fletcher 1986; Hendon et al. 2009).

Setiap El Niño mempunyai pengelasan tersendiri iaitu fasa perkembangan yang berbeza dan mempunyai beberapa faktor yang turut menyumbang kepada kejadian yang normal ataupun super El Niño (Chen et al. 2017; Hong & Li 2009; Hong, Lin & Jin 2014; Kim & An 2018; Lim et al. 2017; Paek, Yu & Qian 2017). Chen et al. (2017) dan Hong, Lin dan Jin (2014) menentukan fenomena super El Niño berlaku apabila SPLA melebihi El Niño yang lain dengan satu sisihan piawai dan $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ lebih panas di kawasan Niño-3, seperti yang berlaku pada tahun 1982/83, 1997/98 dan 2015/16. Kajian lepas menunjukkan jenis El Niño yang berbeza mempunyai corak peredaran angin dan taburan hujan anomali yang berbeza (Kao & Yu 2009; Kug, Jin & An 2009; Nguyen-Thanh, Ngo-Duc & Herrmann 2023; Salimun et al. 2014). Tahun 1982/83 merupakan fenomena El Niño konvensional yang ekstrem berikutan corak SPLA yang berbeza, bacaan magnitud yang tinggi dan peredaran melintang di hemisfera selatan yang unik (Hong, Lin & Jin 2014). Peredaran melintang yang memuncak semasa musim panas boreal telah menguatkan angin baratan aras rendah di Pasifik tropika seterusnya menggalakkan perkembangan super El Niño pada tahun 1982/83. Tahun ini sahaja telah menyebabkan seluruh dunia mengalami kerugian sebanyak \$4.1 trilion kesan daripada impak yang diterima.

Kemarau ekstrem berlaku di AT pada tahun 1997/98 disebabkan oleh peristiwa gabungan El Niño konvensional yang hadir bersama IOD positif (Doi, Behera & Yamagata 2020; Luo et al. 2010; Meyers et al. 2007). IOD berlaku disebabkan interaksi antara lautan dan atmosfera di kawasan LH dan dikategorikan mengikut indeks bacaan positif dan negatif (Saji et al. 1999). Pergerakan udara menaik peredaran Walker berlaku di timur LP dan LH, manakala pergerakan udara menurun berlaku di kawasan Benua Maritim (BM) (Amirudin et al. 2020), seterusnya mendorong kepada keadaan kering di kawasan tersebut. Kajian di Indonesia mendapati impak taburan hujan semasa gabungan El Niño dan IOD positif adalah kuat semasa musim kering (Jun -November) dan lemah semasa musim lembap (Disember - Mei) (Kurniadi et al. 2022; Nur'utami & Hidayat 2016). IOD mempunyai terkunci-fasa iaitu mencapai fasa puncaknya semasa musim SON dan akan membawa impak negatif yang maksimum terutamanya apabila berlaku serentak dengan kehadiran El Niño (Amirudin et al. 2020; Sri Nurdianti et al. 2022). Fenomena tahun 1997/98 telah menyebabkan kerugian

harta benda sebanyak \$5.7 trilion dan meragut nyawa manusia sebanyak 23,000 orang di seluruh dunia (Callahan & Mankin 2023; Liu et al. 2023). Turut berlaku impak yang signifikan seperti krisis bekalan air, gelombang haba, kekurangan hasil tanaman, kemusnahan hutan tropika yang mendorong berlakunya kebakaran hutan di Indonesia seterusnya menyebabkan kejadian jerebu yang sangat teruk dan tersebar ke negara-negara sekitarnya (Kogan & Guo 2017; Kemarau et al. 2024; Tangang 2010; Thirumalai et al. 2017).

Senario yang agak kritikal turut berlaku pada tahun 2015/16 tetapi sedikit berlainan daripada tahun 1982/83 dan 1997/98. Kejadian El Niño pada tahun ini adalah gabungan antara dua jenis El Niño iaitu konvensional dan Modoki (Lim et al. 2017; Wang & Wang 2013). El Niño Modoki yang berlaku pada tahun ini adalah jenis dua (El Niño Modoki II), iaitu corak suhu permukaan laut yang panas mendominasi kawasan subtropika timur laut Pasifik hingga tengah Pasifik khatulistiwa dan bercorak tidak simetri (Wang & Wang 2013). Turut berlaku peristiwa IOD positif pada tahun ini yang memuncak pada bulan September (Lestari et al. 2018) namun bacaan amplitud hanya 0.8°C (Liu et al. 2017). Tahun ini turut terjadi beberapa peristiwa ekstrem seperti gelombang haba, kebakaran hutan, masalah kesihatan dan kematian (Chaturvedi & Mansi 2022).

Beberapa kajian telah dijalankan untuk melihat impak keragaman iklim terhadap taburan hujan di AT. Kajian oleh Nguyen-Thanh, Ngo-Duc dan Herrmann (2023) dan Nguyen-Le, Ngo-Duc dan Herrmann (2024) telah melihat taburan hujan ketika fenomena ENSO yang berbeza berlaku di AT, namun kajian tersebut hanya berfokus kepada satu keragaman iklim dan tidak mengelaskan mengikut keamatan ENSO yang terjadi. Salimun et al. (2014) dan Iskandar, Lestari dan Nur (2019) telah menganalisis kesan taburan hujan dan tele-hubungan semasa kejadian dua jenis El Niño (konvensional dan Modoki), tetapi tidak mengambil kira keamatan El Niño. Lokasi kajian tersebut juga hanya tertumpu kepada negara Malaysia dan Indonesia sahaja. Selain itu, Amirudin et al. (2020) telah mengkaji tele-hubungan semasa kejadian individu dan gabungan El Niño dan IOD terhadap taburan hujan di AT, namun kajian tertumpu pada semua tahun El Niño yang berlaku secara umum (komposit). Terdapat juga kajian yang menggunakan prestasi model dalam mensimulasi taburan hujan di AT semasa fenomena keragaman iklim berlaku (Aminoto et al. 2024; Khadka et al. 2022), namun perhatian kajian adalah kepada keupayaan dan sensitiviti model dalam mensimulasi taburan hujan. Oleh itu, masih terdapat jurang pemahaman terhadap perbezaan gabungan keragaman iklim terhadap taburan hujan di AT. Kebaharuan kajian ini adalah perbandingan tele-hubungan yang komprehensif antara tiga peristiwa super El Niño (1982/83, 1997/98 dan 2015/16) dengan tumpuan khusus pada AT.

Motivasi kepada kajian ini adalah untuk melihat perbezaan tele-hubungan semasa super El Niño (konvensional dan Modoki) sehingga menyebabkan

perbezaan impak terhadap taburan hujan di AT. Kajian ini akan membandingkan tiga episod super El Niño yang berbeza berdasarkan ciri unik masing-masing; 1982/83 (El Niño konvensional), 1997/98 (El Niño konvensional dengan IOD positif yang berpanjangan) dan 2015/16 (gabungan El Niño konvensional dan Modoki dengan IOD positif yang lemah). Kajian ini penting untuk mengecilkan jurang pengetahuan mengenai keamatan dan jenis El Niño yang berbeza bagi meningkatkan sistem keboleh ramalan taburan hujan di AT. Informasi yang diperoleh juga akan membantu kepada pengguna akhir yang memerlukan perancangan jangka panjang seperti bidang agrikultur, aliran dan saliran serta perancang bandar. Kajian ini adalah selaras dengan matlamat pembangunan lestari iaitu: matlamat 11 (bandar dan masyarakat mampan), matlamat 13 (tindakan iklim) dan matlamat 15 (kehidupan di darat). Manuskrip ini disusun mengikut seksyen seperti berikut: data dan kaedah, taburan hujan anomali, SPLA, mekanisme peredaran atmosfera dan tele-hubungan dan akhir sekali kesimpulan.

DATA DAN KAEDAH

Data taburan hujan bulanan beresolusi $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ daripada Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) (Schneider et al. 2011) digunakan dalam kajian ini. Ia merangkumi tahun 1982 hingga 2020. Data GPCC dipilih untuk mendapatkan hasil konsisten dengan analisis lepas (Amirudin et al. 2020; Dhungana et al. 2022; Lin & Qian 2019; Salimun et al. 2014). Data *Oceanic Niño Index* (ONI) daripada The Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST) digunakan untuk mendapatkan tahun El Niño, iaitu berdasarkan purata 3 bulan SPLA di kawasan Niño 3.4 (5°U - 5°S , 120°T - 170°T). Seterusnya, data pemboleh ubah atmosfera dan lautan seperti corak peredaran angin, suhu udara, kelembapan relatif dan anomali kelajuan mencancang diperoleh daripada National Centres for Environmental Prediction/National Centre for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (Kalnay et al. 1996) dengan resolusi $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Ia merupakan produk daripada penganalisan semula. Analisis statistik adalah menggunakan pendekatan Monte Carlo, dengan 500 bilangan ulangan yang mampu memberikan hasil min dan sisihan piawai stabil (Cui et al. 2023; Zhang, Qu & Ye 2009). Nilai yang diperhatikan signifikan pada tahap keyakinan 95% berupaya untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap ketidakpastian serta meningkatkan ketepatan penilaian statistik. Anomali piawai di bawah min dikira dalam dua langkah. Pertama, purata klimatologi bulanan ditolak daripada data asal untuk mendapatkan anomali. Seterusnya, nilai anomali tersebut dibahagikan dengan sisihan piawai klimatologi bulanan bagi menghasilkan anomali piawai di bawah min. Formula pengiraan adalah seperti berikut:

$$SA_i = \frac{X_i - \bar{X}_{clim}}{\sigma_{clim}}$$

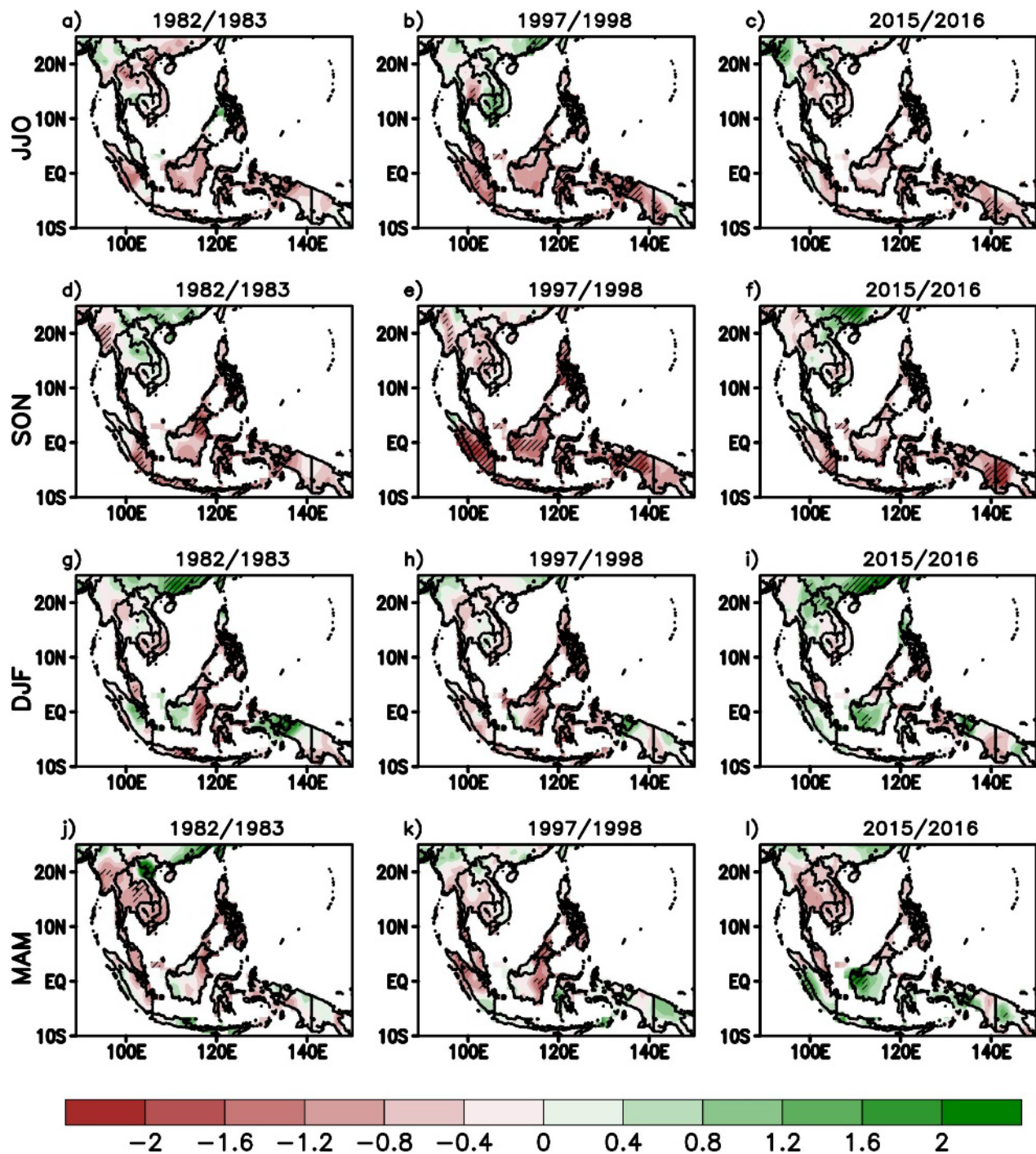
Kajian ini akan memberi fokus kepada tahun kejadian El Niño yang ekstrem berdasarkan suhu permukaan laut bulanan. Tahun terpilih adalah pada 1982/83, 1997/98 dan 2015/16, iaitu berdasarkan kajian tahap kekuatan El Niño oleh Huang et al. (2016). Selain itu, corak dan jenis El Niño yang berbeza bagi ketiga-tiga peristiwa tersebut juga menjadi tarikan untuk kajian ini dijalankan. Data tahunan akan dibahagikan kepada empat mengikut musim Jun-Julai-Ogos (JJO), September-Oktober-November (SON), Disember-Januari-Februari (DJF) dan Mac-April-Mei (MAM). Peristiwa ini akan dianalisis secara mendalam untuk memahami perbezaan mekanisme dan tele-hubungan yang menyumbang kepada variasi impak terhadap rantau ini.

HASIL DAN PERBINCANGAN

TABURAN HUJAN ANOMALI

Rajah 1 menunjukkan anomali taburan hujan di AT bagi tiga tahun fenomena super El Niño iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16. Santoso, Mcphaden dan Cai (2017) turut menjalankan perbandingan anomali taburan hujan bagi peristiwa super El Niño yang sama, namun analisis tersebut terhad kepada kawasan LP semasa fasa puncak El Niño (musim DJF). Sebaliknya, kajian ini memperluas skop analisis dari segi ruang dan musim, menjadikannya lebih komprehensif dalam memahami kesan tele-hubungan super El Niño di AT. Semasa musim JJO secara umumnya, ketiga-tiga fenomena ini menunjukkan keadaan kering terutamanya di bahagian selatan AT. Keadaan kering ini signifikan terutamanya di Semenanjung Malaysia, Sumatra, Sulawesi dan Celebes semasa peristiwa El Niño 1997/98. Keadaan basah juga dapat diperhatikan di utara AT terutamanya di negara Indochina semasa JJO (Rajah 1(a), 1(b), 1(c)). Pada musim SON, kedudukan kawasan kering berevolusi ke arah timur laut dan menjadi lebih signifikan berbanding musim JJO (Rajah 1(d), 1(e), 1(f)). Diperhatikan bahawa keadaan kering signifikan yang tinggi berlaku di selatan AT khasnya pada peristiwa El Niño 1997/98 berbanding dua peristiwa El Niño yang lain. Perbezaan signifikan ini berkait rapat dengan kewujudan El Niño bersama IOD positif yang akan menambahkan impak fenomena El Niño terhadap taburan hujan di AT (Amirudin et al. 2020). Keamatan semasa peristiwa El Niño 2015/16 kelihatan lebih rendah berbanding yang lain kerana impak fenomena El Niño Modoki adalah lebih lemah berbanding El Niño konvensional (Salimun et al. 2014). Selain itu, impak El Niño tulen juga adalah lebih lemah berbanding gabungan El Niño dan IOD (Amirudin et al. 2020) yang ditunjukkan oleh peristiwa El Niño 1982/83 dan El Niño 1997/98 (Rajah 2(d), 2(e)).

Semasa musim DJF, impak maksimum El Niño diperhatikan telah beralih ke kawasan pantai timur AT iaitu utara Borneo dan Filipina. Keadaan ini selaras dengan kajian oleh Juneng dan Tangang (2005) dan Salimun et



RAJAH 1. Taburan hujan anomali bagi tiga tahun kajian iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16 yang disusun mengikut musim JJO, SON, DJF dan MAM. Nilai negatif (positif) iaitu berwarna coklat (hijau) menandakan keadaan kering (lembap). Kawasan berlerek menandakan bacaan signifikan pada aras 95%. Unit adalah dalam mm hari⁻¹

al. (2014). Tahun 1997/98 turut memperlihatkan keadaan kering yang signifikan berbanding tahun 1982/83 dan 2015/16 (Rajah 1(g), 1(h), 1(i)). Pada musim ini, peristiwa El Niño tahun 1982/83 dan 2015/16 telah menunjukkan keadaan yang signifikan basah di selatan (0° - 10° selatan) dan utara (11° - 25° utara) AT. El Niño Modoki semasa 2015/16 adalah cenderung untuk menghasilkan hujan yang lebih tinggi di BM terutamanya di kawasan selatan AT (Ashok et al. 2007; Lim et al. 2017; Nguyen-Le, Ngo-Duc & Herrmann 2024; Wang & Wang 2013). Kajian oleh Salimun et al. (2014) menunjukkan perbezaan impak antara El Niño Modoki dan konvensional di Malaysia semasa musim DJF. Keadaan ini dapat diperhatikan pada El Niño 1997/98 (Rajah 1(h)) dan El Niño 2015/16 (Rajah 1(i)), iaitu semasa El Niño Modoki impak negatif merangkumi kedua bahagian Sabah-Sarawak dan utara semenanjung Malaysia. Sebaliknya, impak semasa El Niño konvensional lebih tertumpu kepada bahagian Sabah-Sarawak. Walau bagaimanapun, kajian tersebut adalah berdasarkan kajian komposit beberapa peristiwa El Niño Modoki dan konvensional. Jika diperhatikan peristiwa El Niño 1982/83 sahaja, impaknya terhadap Malaysia hampir sama dengan Modoki namun seluruh kawasan Semenanjung Malaysia kering dan signifikan (Rajah 1(g)) berbanding hanya di utara Semenanjung Malaysia semasa El Niño Modoki (Rajah 1(i)).

Semasa MAM (Rajah 1(j), 1(k), 1(l)), keadaan yang signifikan kering terus beralih ke arah timur laut. Secara keseluruhan ketiga-tiga peristiwa El Niño pada musim ini kering terutamanya di Indochina dan sedikit kawasan basah di utara 18° U. Walau bagaimanapun, berbanding dua peristiwa yang lain, keadaan basah di kawasan selatan AT kekal dan semakin signifikan semasa El Niño 2015/16. Ringkasan perbezaan anomali taburan hujan bagi setiap musim boleh dirujuk pada Jadual 1.

SUHU PERMUKAAN LAUT ANOMALI

Rajah 2 menunjukkan corak suhu permukaan laut anomali (SPLA) berskala besar. Dapat diperhatikan ketiga-tiga peristiwa super El Niño yang dikaji turut mempunyai corak SPLA yang berbeza berikutan ketiga-tiganya mempunyai ciri-ciri yang tersendiri. Corak suhu permukaan laut di barat LP, Laut Jawa (LJ), LH dan Laut China Selatan (LCS) sangat mempengaruhi anomali taburan hujan di AT (Juneng & Tangang 2005).

Secara umumnya, dapat dilihat dengan jelas bahawa terdapat perbezaan corak SPLA bagi ketiga-tiga fenomena super El Niño ini. Semasa musim JJO, iaitu fasa permulaan El Niño, ketiga-tiga super El Niño menunjukkan pembentukan pemanasan lidah di LP (Rajah 2(a), 2(b), (c)). Walau bagaimanapun, semasa El Niño 1982/83 dan 1997/98, pemanasan lebih tertumpu di bahagian timur LP kerana kedua-duanya adalah El Niño konvensional dengan keamatan yang berbeza. Sebaliknya, fenomena El Niño 2015/16 pula menunjukkan pemanasan yang lebih tertumpu di bahagian kawasan subtropika timur laut

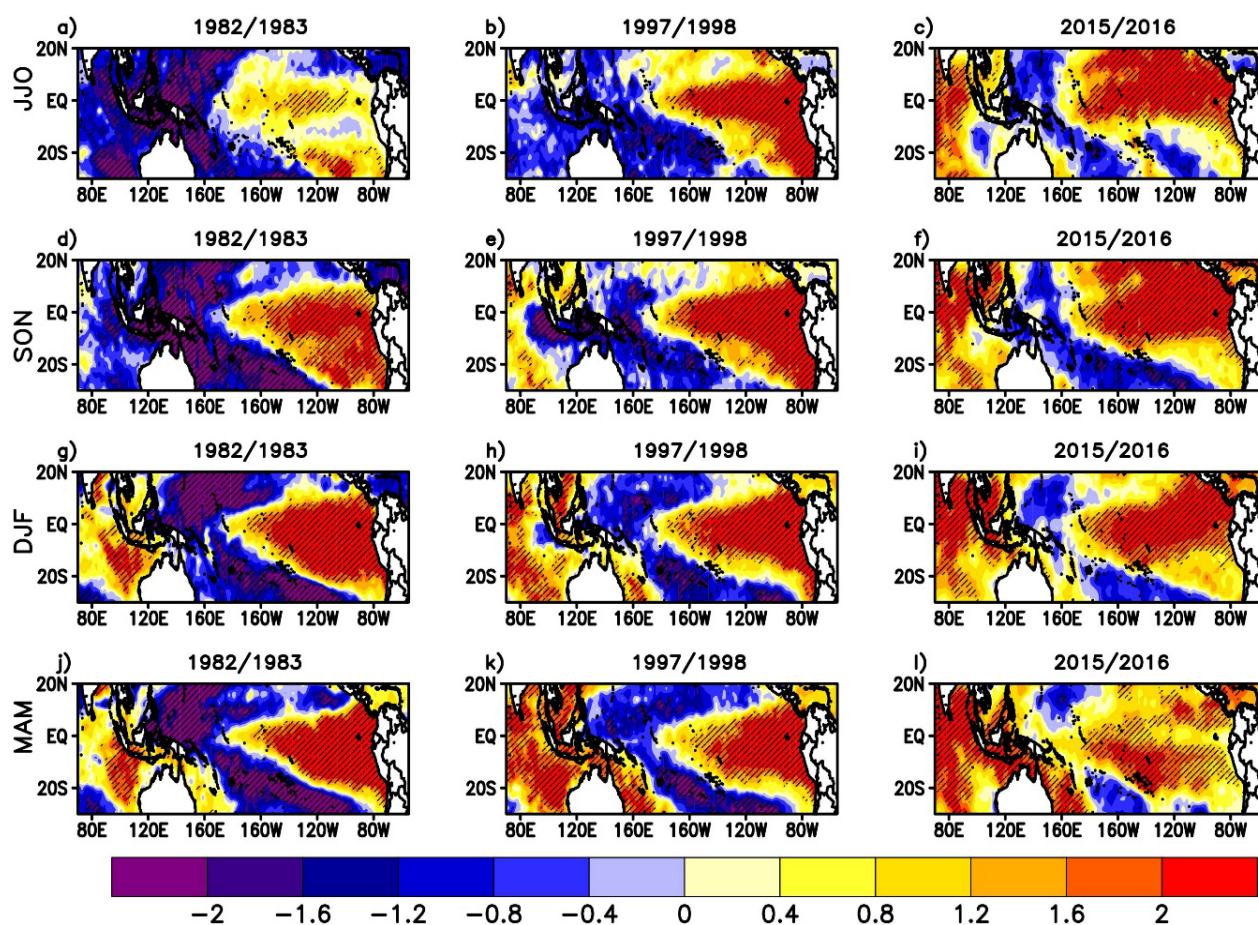
Pasifik hingga ke tengah Pasifik khatulistiwa berikutan peristiwa ini adalah gabungan dua jenis El Niño iaitu El Niño konvensional dan El Niño Modoki II (Rajah 2(c)). SPLA di LH dan LCS juga menunjukkan perbezaan corak bagi ketiga-tiga peristiwa El Niño ini. El Niño 1982/83 menunjukkan keadaan LH dan LCS yang sejuk sementara dua El Niño yang lain menunjukkan LCS yang lebih panas. Selain itu, pembentukan *Indian Ocean Dipole* (IOD) mula terbentuk di LH (Rajah 2(b), 2(c)). Keadaan SPLA sejuk berbentuk bumerang di barat LP semasa El Niño 1982/83 adalah signifikan (Rajah 2(a)). Bagi El Niño 1997/98 dan 2015/16, lengan selatan lebih kuat berbanding lengan utara (Rajah 2(b), 2(c)).

Semasa musim SON iaitu fasa perkembangan El Niño, keamatan pemanasan di LP berbentuk lidah bertambah dan lebih signifikan bagi ketiga-tiga peristiwa El Niño (Rajah 2(d), 2(e), 2(f)). Semasa El Niño 1982/83, keadaan di LH dan LCS secara umumnya masih didominasi oleh keadaan SPLA yang sejuk. Keadaan sejuk berbentuk bumerang pula semakin kuat di bahagian lengan selatan dan signifikan. Berbeza dengan El Niño 1997/98 dan 2015/16, fenomena IOD di LH telah menjadi matang. Walau bagaimanapun, fenomena IOD ketika El Niño 1997/98 lebih jelas dan berkeamatan tinggi berbanding ketika El Niño 2015/16. Menurut Liu et al. (2017), corak SPLA semasa 2015/16 yang tidak simetri dan kekuatan Bjerkness *feedback* yang minimum telah melemahkan IOD pada tahun ini. Namun, SPLA di LCS pula sangat tinggi dan signifikan semasa El Niño 2015/16 berbanding El Niño 1997/98 (Rajah 2(e), 2(f)). Pada musim ini, lengan utara bumerang mula menjadi lebih kuat semasa El Niño 1997/98 sementara lengan utara bumerang El Niño 2015/16 tidak berubah berikutan pemanasan lidah di bahagian kawasan subtropika timur laut Pasifik yang semakin bertambah dan mendominasi kawasan tersebut.

Musim DJF merupakan fenomena matang bagi peristiwa El Niño. Oleh yang demikian, dapat diperhatikan struktur lidah yang panas di LP sangat jelas dan signifikan bagi ketiga-tiga peristiwa (Rajah 2(g), 2(h), 2(i)). Walau bagaimanapun, dapat diperhatikan dengan jelas perbezaan struktur bentuk pemanasan bagi El Niño konvensional (Rajah 2(g), 2(h)) dan El Niño gabungan (konvensional dan Modoki II) (Rajah 2(i)). Keputusan ini selaras dengan Santoso, McPhaden dan Cai (2017) iaitu maklum balas advectif zon di kawasan Niño 4 adalah lebih besar semasa 1982/83 dan 1997/98 berbanding semasa 2015/16. Lengan utara SPLA sejuk berbentuk bumerang juga semakin kuat dan signifikan bagi dua fenomena El Niño konvensional (Rajah 2(g), 2(h)). IOD merupakan peristiwa terkunci-fasa kepada dua musim iaitu musim JJO dan SON. Oleh itu, peristiwa IOD semasa 2015/16 telahpun lenyap dan menjadikan kawasan LH, LCS dan lautan sekitarnya lebih panas. Walau bagaimanapun, fenomena IOD yang wujud bersama El Niño 1997/98 adalah unik kerana ia berpanjangan sehingga ke musim DJF (Murtugudde, McCreary Jr. & Busalacchi 2000; Yu & Rienecker 1999) (Rajah 2(h)).

JADUAL 1. Ringkasan taburan hujan anomali bagi setiap tahun kajian secara musiman

Tahun / Musim	1982/83 (El Niño konvensional)	1997/98 (El Niño konvensional dengan IOD positif yang berpanjangan)	2015/16 (gabungan El Niño konvensional dan Modoki dengan IOD positif yang lemah)
JJO	Keadaan kering di selatan AT (tidak signifikan) tetapi beberapa kawasan di utara AT signifikan	Keadaan kering di selatan dan beberapa kawasan di utara AT (signifikan)	Keadaan kering di selatan dan beberapa kawasan di utara AT (tidak signifikan)
	Keadaan basah di utara AT (tidak signifikan)	Beberapa keadaan basah di utara AT (signifikan)	Beberapa keadaan basah di utara AT (signifikan)
	Keamatan kering sederhana berbanding yang lain (tidak signifikan)	Keamatan kering tinggi berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)
	Keamatan basah rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)	Keamatan basah tinggi berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan basah sederhana (signifikan)
SON	Keadaan kering di selatan AT (signifikan) di beberapa tempat sahaja	Keadaan kering di selatan AT (signifikan)	Keadaan kering di selatan AT (signifikan) di beberapa tempat sahaja
	Keadaan basah di utara AT (tidak signifikan)	Beberapa keadaan basah di AT (tidak signifikan)	Keadaan basah di utara AT (signifikan)
	Keamatan kering sederhana berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering tinggi berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering rendah berbanding yang lain (signifikan)
	Keamatan basah sederhana berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan basah rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)	Keamatan basah tinggi berbanding yang lain (signifikan)
DJF	Keadaan kering di kawasan timur Borneo dan Semenanjung Malaysia (signifikan)	Keadaan kering mendominasi kawasan AT, Sabah, Sarawak dan timur Kalimantan (signifikan)	Keadaan kering di Malaysia, Filipina, Sulawesi dan Papua Tengah (tidak signifikan)
	Keadaan basah di sebahagian Sumatra, barat Borneo dan Papua (tidak signifikan)	Keadaan basah di kawasan 20° utara dan timur Indonesia (tidak signifikan)	Keadaan basah di Indonesia dan 10° utara dan ke atas (signifikan)
	Keamatan kering sederhana berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering tinggi berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)
	Keamatan basah sederhana berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan basah rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)	Keamatan basah tinggi berbanding yang lain (signifikan)
MAM	Keadaan kering di bahagian utara AT, Thailand dan Myanmar (signifikan)	Keadaan kering garisan Khatulistiwa hingga 20° utara (beberapa kawasan signifikan)	Keadaan kering di utara AT (tidak signifikan)
	Keadaan basah di kawasan 20° utara (tidak signifikan) dan beberapa kawasan (tidak signifikan)	Keadaan basah di selatan AT dan 20° utara (tidak signifikan)	Keadaan basah di khatulistiwa dan selatan AT (signifikan)
	Keamatan kering sederhana berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering tinggi berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan kering rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)
	Keamatan basah sederhana berbanding yang lain (signifikan)	Keamatan basah rendah berbanding yang lain (tidak signifikan)	Keamatan basah tinggi berbanding yang lain (signifikan)



RAJAH 2. Suhu permukaan laut anomali (SPLA) bagi tiga tahun kajian iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16 yang disusun mengikut musim JJO, SON, DJF dan MAM. Nilai negatif (positif) menandakan keadaan sejuk (panas). Kawasan berlorek menandakan bacaan signifikan pada aras 95%. Unit adalah dalam °C

Pada musim MAM, fenomena El Niño berada pada fasa akhir. Keamatan lidah panas di LP berkurangan bagi ketiga-tiga fenomena super El Niño menyebabkan lengan sejuk utara bertambah bagi El Niño 1982/83 dan 1997/98 (Rajah 2(j), 2(k)). Pada musim ini, IOD telah pun lenyap dan menjadikan LH, LCS, Laut Jawa dan sekitarnya lebih panas bagi ketiga-tiga fenomena super El Niño namun dengan keamatan yang berbeza.

Dapat dirumuskan bahawa ketiga-tiga tahun ini merupakan peristiwa super El Niño berdasarkan corak SPLA yang signifikan serta mempunyai lokasi pemanasan yang berbeza. Hasil SPLA daripada kajian ini konsisten dengan penemuan oleh Santoso, Mcphaden dan Cai (2017). Kajian tersebut membandingkan ciri-ciri El Niño 2015/16 dengan 1997/98 dan 1982/83 dan menyatakan bahawa El Niño 2015/16 adalah kemunculan pertama El Niño ekstrem pada abad ke-21. Menurut Hong, Lin dan Jin (2014), bacaan magnitud dan indeks *Southern Hemisphere Booster* (SHB) yang tinggi semasa musim JJO dan SON akan mendorong kepada kejadian super El Niño pada musim sejuk. Evolusi

corak SPLA di kawasan Indo-Pasifik semasa fenomena El Niño dan IOD telah banyak dibincangkan kerana ia memainkan peranan penting dalam mencorak anomali taburan hujan di kawasan AT (Amirudin et al. 2020; Caesar et al. 2011; Juneng & Tangang 2005; Nur'utami & Hidayat 2016; Salimun et al. 2014). Ringkasan perbezaan SPLA bagi setiap musim secara ringkas boleh dirujuk pada Jadual 2.

MEKANISME PEREDARAN ATMOSFERA DAN TELE-HUBUNGAN

Evolusi taburan hujan ke arah timur laut (Rajah 1) berkait rapat dengan interaksi lautan-atmosfera semasa fenomena El Niño. Secara amnya, angin timuran lemah berlaku di LP yang kemudiannya menyumbang kepada pembentukan El Niño. Beberapa faktor fizikal seperti anomali kelajuan angin pada aras rendah (850 hPa), fluks kelembapan dan anomali kelajuan mencancang pada aras 500 hPa digunakan dalam kajian untuk memahami tele-hubungan yang berlaku.

JADUAL 2. Ringkasan suhu permukaan laut anomali (SPLA) bagi setiap tahun kajian secara musiman. Corak pemanasan dan penyejukan berlaku di kawasan Lautan Pasifik (LP), Lautan Hindi (LH) dan Laut China Selatan (LCS)

Tahun / Musim	1982/83 (El Niño konvensional)	1997/98 (El Niño konvensional dengan IOD positif yang berpanjangan)	2015/16 (gabungan El Niño konvensional dan Modoki dengan IOD positif yang lemah)
JJO	LP	- Keamatan pemanasan lidah di kawasan timur (bacaan $< 2^{\circ}\text{C}$, tidak signifikan) - SPLA sejuk berbentuk bumerang di kawasan barat (signifikan)	- Keamatan pemanasan lidah di kawasan subtropika timur laut hingga tengah Pasifik khatulistiwa (bacaan $> 2^{\circ}\text{C}$, signifikan) - SPLA sejuk berbentuk bumerang menunjukkan lengan selatan lebih kuat berbanding lengan utara (signifikan) - SPLA sejuk berbentuk bumerang menunjukkan lengan selatan lebih kuat berbanding lengan utara (tidak signifikan)
	LH	SPLA sejuk (signifikan)	SPLA panas (signifikan)
	LCS	SPLA sejuk (signifikan)	SPLA panas (signifikan)
	LP	Keamatan pemanasan berbentuk lidah bertambah (signifikan)	Keamatan pemanasan berbentuk lidah bertambah (signifikan)
SON		- Lengan selatan bumerang bertambah kuat (signifikan) - SPLA sejuk (tidak signifikan)	Lengan utara bumerang tidak berubah (tidak signifikan)
	LH	SPLA sejuk (tidak signifikan)	SPLA panas dan lebih jelas (fasa matang IOD positif) (signifikan)
	LCS	SPLA sejuk (tidak signifikan)	SPLA panas lebih tinggi (signifikan)
	LP	Struktur lidah yang panas sangat jelas (signifikan)	Struktur lidah yang panas sangat jelas (signifikan)
DJF		Lengan utara bumerang bertambah kuat (signifikan)	Lengan utara bumerang tidak berubah (tidak signifikan)
	LH	SPLA panas (signifikan)	SPLA panas (signifikan)
	LCS	SPLA panas (tidak signifikan)	SPLA panas (signifikan)
	LP	Keamatan pemanasan berbentuk lidah berkurang (signifikan)	Keamatan pemanasan berbentuk lidah berkurang (signifikan)
MAM		Lengan utara bumerang bertambah kuat (signifikan)	Lengan utara bumerang berkurang
	LH	SPLA panas (tidak signifikan)	SPLA panas (signifikan)
	LCS	SPLA panas (tidak signifikan)	SPLA panas (signifikan)

Anomali kelajuan angin pada aras rendah (850 hPa) pada Rajah 3 menunjukkan semasa musim JJO bagi ketiga-tiga tahun super El Niño, anomali angin di Pasifik barat yang signifikan bertiup ke kawasan timur Pasifik (Rajah 3(a), 3(b), 3(c)). Keadaan ini menolak SSTA yang panas ke arah tengah dan timur Pasifik tropika. Ketiga-tiga tahun kajian menunjukkan ciri yang hampir sama selaras dengan fasa pembentukan super El Niño pada musim ini. Kelajuan anomali angin timuran di kawasan khatulistiwa LH pada tahun 1982/83 pula agak lemah berbanding dua tahun kajian yang lain (1997/98 dan 2015/16). Keadaan ini menyumbang kepada pembentukan IOD positif pada tahun 1997/98 dan 2015/16, tetapi tiada IOD positif terbentuk semasa musim JJO 1982/83 (Rajah 2(a), 2(b), 2(c), 3(a), 3(b), 3(c)).

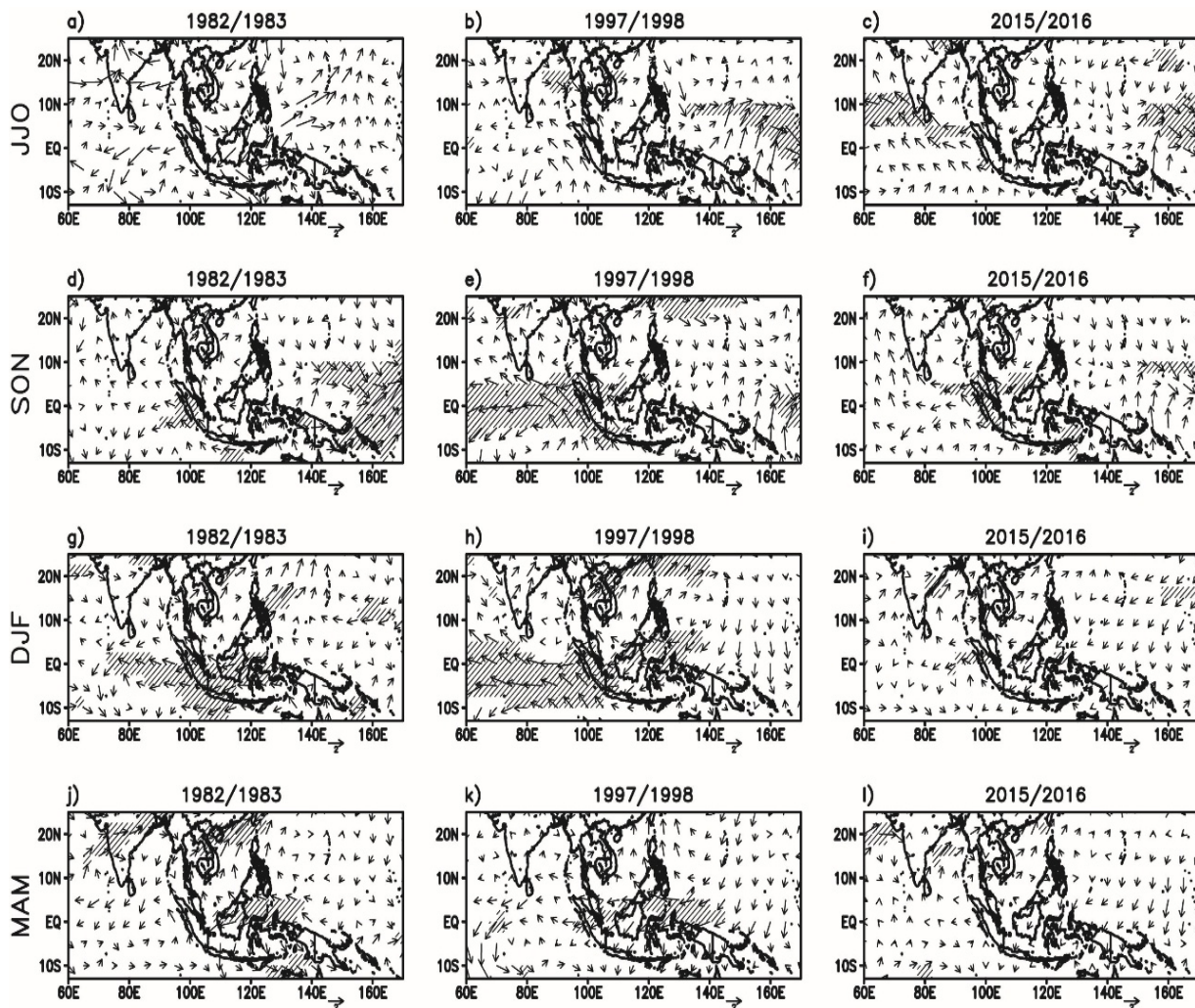
Sistem anti-siklonik yang terbentuk di persekitaran laut AT akan menentukan kawasan yang berkeadaan kering di AT mengikut musim (Amirudin et al. 2020; Juneng & Tangang 2005; Salimun et al. 2014; Supari et al. 2018). Sistem anti-siklonik wujud di kawasan selatan LH, Teluk Bengal, laut Filipina sepanjang ketiga-tiga tahun kajian dengan keamatan yang berbeza mengikut peralihan musim. Secara umumnya, sistem anti-siklonik di kawasan selatan LH akan membawa keluar kelembapan dari Sumatra ke kawasan LH manakala sistem anti-siklonik di kawasan laut Filipina akan membawa keluar kelembapan dari Kepulauan Borneo dan Filipina ke kawasan barat LP. Semasa musim JJO, kawasan selatan AT mengalami keadaan kering manakala sedikit basah di kawasan Indochina (Rajah 1(a), 1(b), 1(c)). Dapat dilihat keadaan yang signifikan kering di selatan AT termasuk Semenanjung Malaysia, Sumatra, Sulawesi dan Celebes semasa 1997/98 berbanding 1982/83 dan 2015/16 (Rajah 1(b)). Konsisten dengan anomali angin pada aras rendah, Rajah 4(a), 4(b), 4(c) menunjukkan pergerakan udara menurun yang signifikan di kawasan BM. Keadaan ini menjadikan kawasan pencapahan di AT terutamanya di bahagian selatan (Rajah 5(a), 5(b), 5(c)) dan memberi impak negatif di kawasan tersebut (Rajah 1(a), 1(b), 1(c)).

Sistem anti-siklonik di selatan LH, Teluk Bengal dan berhampiran laut Filipina pada musim SON adalah pembentukan dari musim sebelumnya dengan keamatan yang semakin kuat di selatan LH (Rajah 3(d), 3(e), 3(f)). Dwipolar signifikan yang terbentuk menyebabkan pembentukan anti-siklonik yang kuat di selatan LH. Sistem ini menyebabkan keadaan yang kering signifikan di AT terutamanya di bahagian selatan kerana kelembapan telah dibawa keluar dari kawasan tersebut (Rajah 1(e), 3(e)). Walau bagaimanapun, di utara Sumatera mengalami keadaan yang basah berikutan sistem anti-siklonik di selatan LH tidak mempengaruhi kawasan tersebut. Keadaan kering yang lebih signifikan di selatan AT pada tahun 1997/98 adalah disebabkan oleh terdapatnya gabungan fenomena El Niño dan IOD berbanding dua tahun kajian yang lain. Pada musim SON juga merupakan fasa puncak bagi IOD dan fasa pengembangan El Niño. Keadaan kering di selatan

AT juga selaras dengan pergerakan udara yang menurun di bahagian selatan AT bagi ketiga-tiga fenomena super El Niño yang menghalang pembentukan hujan berlaku di kawasan tersebut (Rajah 5(d), 5(e), 5(f)). Namun, keadaan basah turut berlaku di utara Sumatra disebabkan terdapatnya pergerakan udara menaik di kawasan tersebut.

Semasa musim DJF, perubahan evolusi kawasan kering bergerak ke arah timur laut dapat dilihat pada ketiga-tiga tahun kajian (Rajah 1(g), 1(h), 1(i)). Ia disebabkan sistem anti-siklonik di laut Filipina menjadi kuat manakala lemah di selatan LH. Namun, semasa 1982/83 (Rajah 3(g)) anomali angin signifikan yang bertiup dari Laut Celebes semasa 1982/83 (Rajah 3(g)) ke arah LH menurunkan hujan di kawasan Sumatra, barat Borneo, Kalimantan dan Papua (Rajah 1(g)). SPLA di kawasan timur LH yang panas turut mendorong kawasan tersebut menjadi basah (Rajah 2(g)). Walau bagaimanapun, keadaan adalah kering di Semenanjung Malaysia, utara Borneo dan timur Borneo kerana terdapat pencapahan yang menghalang pembentukan hujan (Rajah 5(g)). Pada gambaran berskala besar, terdapat pergerakan udara menurun di kawasan-kawasan tersebut (Rajah 5(g)). Berbeza pada tahun 1997/98 berikutan anomali tiupan angin yang kuat di kawasan Laut Sumatra dan Laut Filipina telah membawa lembapan keluar dan menjadikan BM sebagai kawasan pencapahan (Rajah 1(h)). Tahun ini juga merupakan IOD positif yang berpanjangan menurut Murtugudde, McCreary Jr. dan Busalacchi (2000) dan Yu dan Rienecker (1999). Corak anomali kelajuan mencancang pada aras 500 hPa semakin melemah namun udara menurun masih merangkumi longitud $90^{\circ}\text{T} - 150^{\circ}\text{T}$ semasa 1997/98 berbanding tahun yang lain (Rajah 5(g), 5(h), 5(i)). Keadaan ini menyebabkan BM kekal signifikan kering pada 1997/98 berbanding 1982/83 dan 2015/16 (Rajah 1(g), 1(h), 1(i)). Pergerakan udara menaik yang dominan di kawasan selatan (Rajah 5(i)) telah menyumbang kepada keadaan yang lebih basah pada tahun 2015/16 (Rajah 3(i)). Selain itu, kesan Modoki pada tahun ini juga telah meningkatkan taburan hujan semasa fasa puncak El Niño. Ia selaras dengan kajian yang dilakukan oleh Ashok et al. (2007), Lim et al. (2017), Nguyen-Le, Ngo-Duc dan Herrmann (2024) dan Wang dan Wang (2013).

Anomali kitaran angin aras rendah mulai lemah semasa musim MAM, namun masih signifikan di kawasan BM pada tahun 1982/83 dan 1997/98 (Rajah 3(j), 3(k)). Kitaran anti-siklonik di kawasan selatan LH dan laut Filipina pada 1982/83 dan 1997/98 masih kelihatan namun semakin lemah berikutan fasa El Niño yang semakin menyusut (Rajah 3(j), 3(k)). Corak evolusi kawasan kering bergerak ke arah timur laut dilihat sepanjang musim iaitu konsisten dengan kajian oleh Amirudin et al. (2020), Juneng dan Tangang (2005), Salimun et al. (2014) dan Tangang et al. (2017). Selaras dengan anomali fluks kelembapan pada aras rendah (Rajah 4(j), 4(k), 4(l)), pencapahan yang signifikan lebih dominan berlaku di kawasan utara AT manakala kawasan selatan mengalami penumpuan. Tahun



RAJAH 3. Anomali peredaran angin pada aras rendah 850 hPa bagi tiga tahun kajian iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16 yang disusun mengikut musim JJO, SON, DJF dan MAM. Kawasan berlorek menandakan bacaan signifikan pada aras 95%. Unit bagi kelajuan angin anomali yang digunakan ialah ms^{-1}

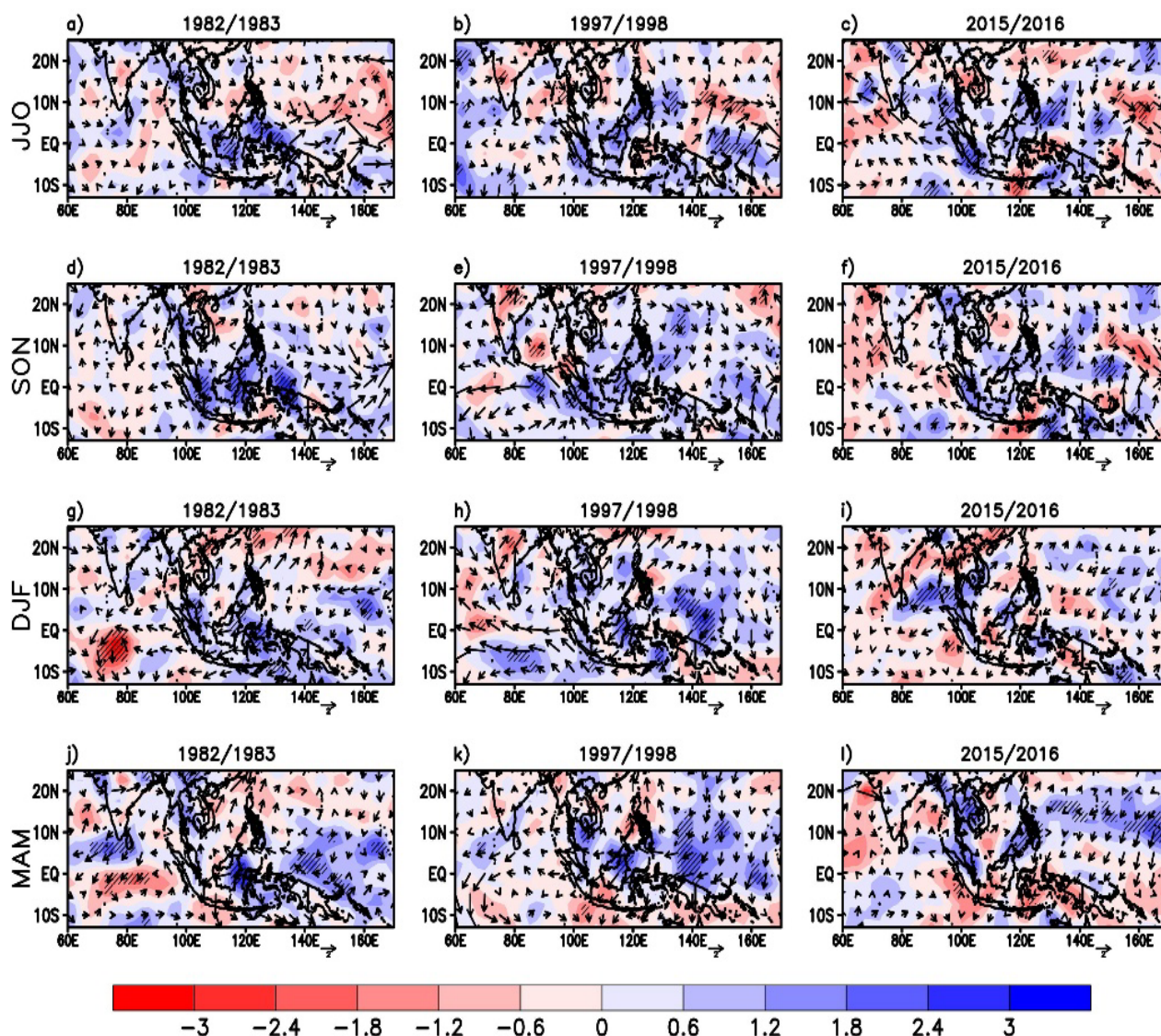
1982/83 dan 1997/98 memperlihatkan pergerakan udara menurun masih mendominasi kawasan BM (10°U - 10°S) tetapi berbeza semasa 2015/16 kerana kawasan selatan mengalami keadaan pergerakan udara menaik yang signifikan (Rajah 5(j), 5(k), 5(l)). Ia mendorong kepada keadaan signifikan kering di kawasan utara AT (10°U) manakala signifikan basah di kawasan selatan (0 - 10°S) (Rajah 1(j), 1(k), 1(l)).

PEREDARAN WALKER

Anomali kelajuan mencancang yang telah dipuratakan dari 5°U - 5°S menjelaskan peredaran Walker yang ditunjukkan pada Rajah 6. El Niño mengubah peredaran Walker dan angin iaitu peredaran tipikal timur-barat menjadi lemah dan pergerakan menaik di tengah dan timur LP (160°T - 80°B). Ia kemudian bergerak ke arah barat, menyebabkan

berlakunya pergerakan udara menurun di kawasan AT. Pergerakan udara menurun akan menindas pembentukan awan dan hujan seterusnya menjadikan kawasan tersebut kering. Hampir seluruh kawasan menunjukkan bacaan yang signifikan positif dan negatif selaras dengan gelaran super El Niño pada tahun ini.

Tele-hubungan daripada kedua-dua lautan semasa peristiwa El Niño dan gabungan bersama IOD akan memberikan impak negatif terhadap anomali taburan hujan di AT (Amirudin et al. 2020; Salimun et al. 2014; Supari et al. 2018; Tangang et al. 2019, 2017). Dapat dilihat corak pergerakan udara positif dan negatif adalah berbeza bagi setiap tahun kajian tetapi mempunyai bacaan yang signifikan. Ini selaras dengan corak anomali taburan hujan yang turut berbeza kawasan kering dan basah di rantau ini semasa ketiga-tiga tahun super El Niño.

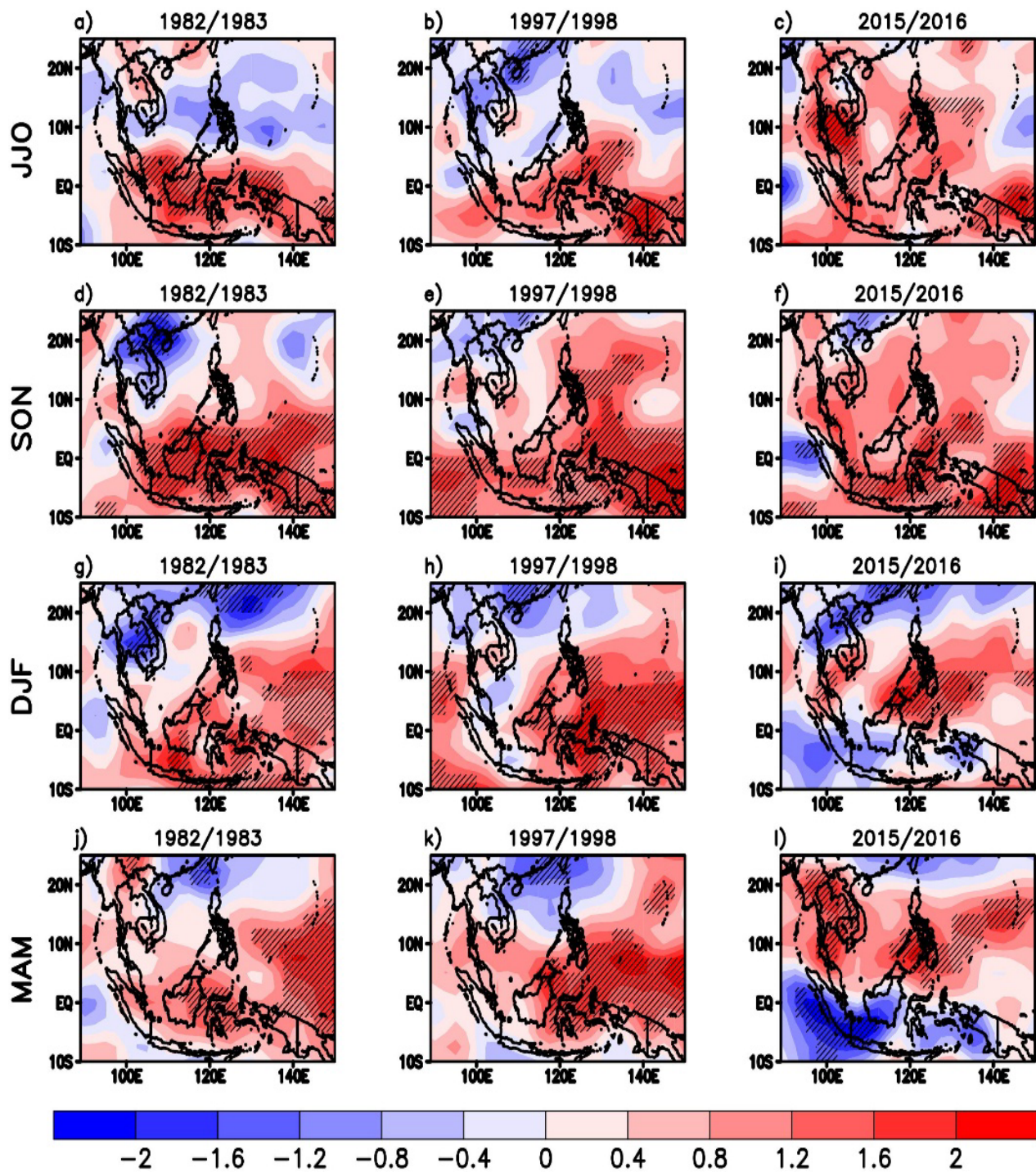


RAJAH 4. Anomali fluks kelembapan bersepadu secara menegak (vektor) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) dan fluks kelembapan pencapahan (berlorek) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) anomali bagi tiga tahun kajian iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16 yang disusun mengikut musim JJO, SON, DJF dan MAM. Kawasan berlorek menandakan bacaan signifikan pada aras 95%. Unit bagi fluks kelembapan ialah $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ manakala magnitud kelajuan angin anomali yang digunakan ialah 2 ms^{-1}

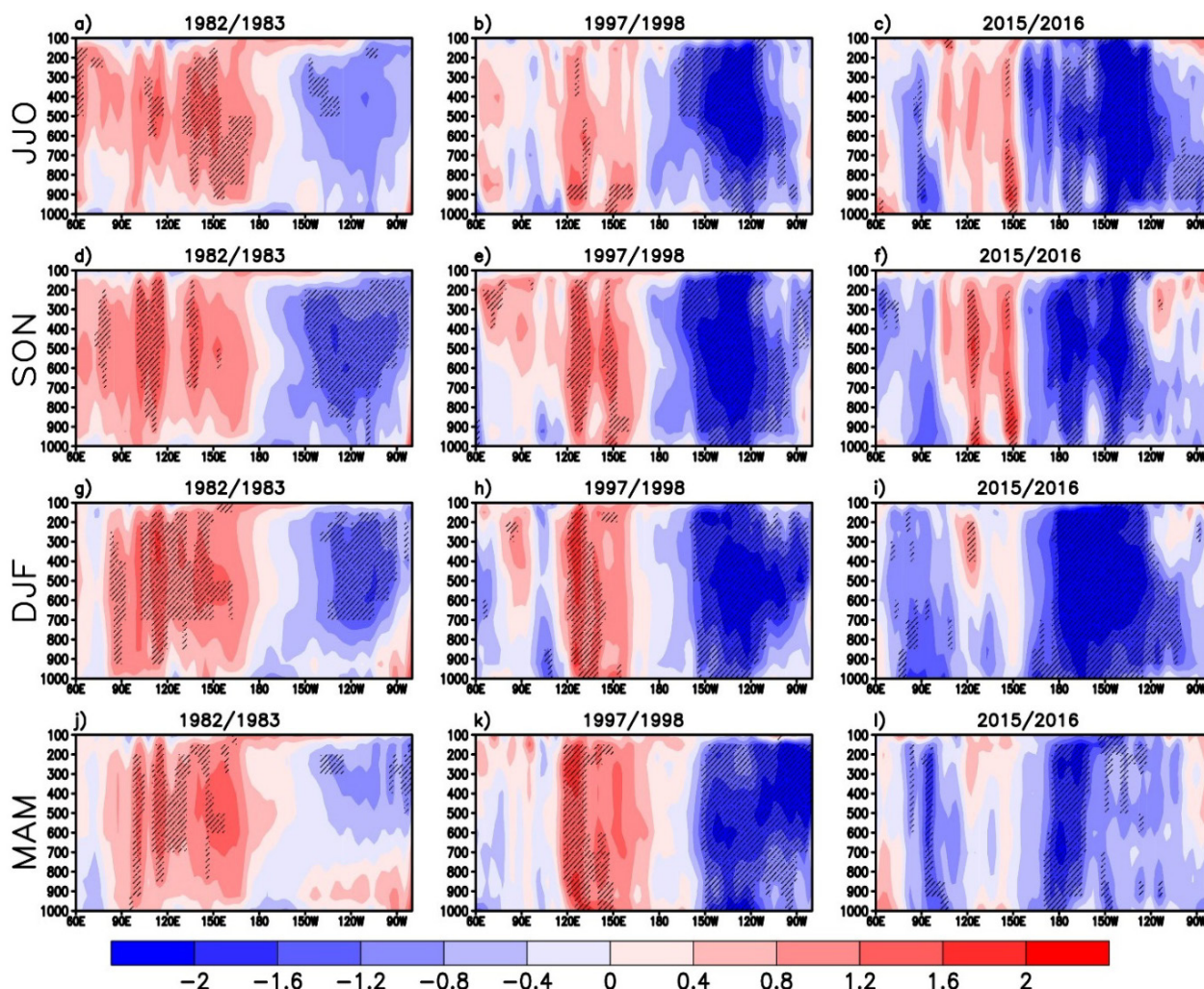
Terdapat perbezaan ketara SPLA bagi setiap peristiwa tahun kajian kerana ia melibatkan El Niño individu (1982/83) serta gabungan bersama IOD (1997/98 dan 2015/16). SPLA di LH semasa 1982/83 adalah panas sementara semasa 1997/98 dan 2015/16 kelihatan dwipolar pada musim JJO dan SON (Rajah 2(a)-2(f)). Semasa dua musim ini, corak peredaran Walker menunjukkan pergerakan udara menaik di kawasan tengah/timur LP dan timur LH semasa peristiwa 1997/98 dan 2015/16 (Rajah 6(b), 6(c), 6(e), 6(f)). Manakala pergerakan udara menurun pula berlaku di kawasan BM bagi ketiga-tiga tahun kajian dengan corak semasa 1982/83 lebih dominan pada dua musim ini. Pergerakan udara menaik dan menurun ini

konsisten dengan kelajuan mencancang pada aras 500 hPa dan corak anomali taburan hujan (Rajah 1 & Rajah 5).

Semasa musim DJF tahun 1982/83, dapat diperhatikan pergerakan udara menurun signifikan mendominasi kawasan BM dan barat Pasifik (90°T - 160°T) (Rajah 6(g)). Ini menyebabkan kawasan Jawa, Timur Borneo (Sabah dan timur Kalimantan), Sulawesi, Semenanjung Malaysia mengalami keadaan kering yang signifikan (Rajah 1(g)). Walau bagaimanapun, kawasan barat Borneo dan Sumatra mengalami keadaan basah berikutan terdapat kawasan penumpuan di LCS pada musim ini (Rajah 1(g), 4(g)). Semasa tahun 1997/98, pergerakan udara menaik yang signifikan berlaku di kawasan tengah/timur LP



RAJAH 5. Anomali kelajuan mencancang pada aras 500 hPa bagi tiga tahun terpilih iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16. Nilai positif yang berwarna merah menandakan pergerakan udara menurun manakala nilai negatif yang berwarna biru menandakan pergerakan udara menaik. Unit adalah Pa s^{-1}



RAJAH 6. Anomali kelajuan mencancang yang meliputi kawasan Lautan Pasifik (LP) dan Lautan Hindi (LH) bagi tiga tahun terpilih iaitu 1982/83, 1997/98 dan 2015/16. Data telah dipuratakan dari 5°U hingga 5°S di kawasan 60°T hingga 80°B dan disusun mengikut musim JJO, SON, DJF dan MAM. Nilai positif iaitu merah bermaksud pergerakan udara menurun manakala nilai negatif iaitu biru bermaksud pergerakan udara menaik. Unit adalah Pa s^{-1}

(170°B-90°B) dan 100°T-110°T seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6(h). Manakala pergerakan udara menurun signifikan berlaku di kawasan 120°T-150°T. Ia telah menghalang proses perolakan di BM dan menjadikan kawasan BM signifikan kering terutamanya di Malaysia Timur, Kalimantan dan Filipina (Rajah 1(h), 6(h)).

Corak lebih jelas berbeza semasa musim DJF tahun 2015/16 iaitu jenis El Niño Modoki. Kawasan di BM didominasi oleh pergerakan udara menaik (Rajah 6(i)) dan menjadikan kawasan ini lebih basah walaupun ketika di fasa puncak El Niño (Rajah 1(i)). Keputusan ini selaras dengan kajian oleh Nguyen-Le, Ngo-Duc dan Herrmann (2024) iaitu corak SPLA semasa El Niño Modoki telah mengubah peredaran Walker lebih ke kawasan utara dan menyebabkan kawasan BM menjadi lebih basah.

Secara umumnya semasa musim MAM, pergerakan udara menaik di LP menjadi semakin lemah berikutan episod El Niño mula berakhir. Namun, masih kelihatan pergerakan udara menurun mendominasi kawasan BM semasa 1982/83 dan 1997/98 dan mendorong kepada keadaan kering yang signifikan terutamanya di kawasan Indochina (Rajah 1). Berbeza semasa El Niño Modoki tahun 2015/16 iaitu pergerakan udara menaik di sekitar BM telah mendorong kepada keadaan yang lebih basah terutamanya di kawasan selatan AT. Keputusan ini selaras dengan corak kelajuan mencancang pada aras 500 hPa dan corak anomali taburan hujan semasa musim ini (Rajah 1 & Rajah 5).

KESIMPULAN

Kajian ini membincangkan perbezaan tele-hubungan semasa episod super El Niño (konvensional dan Modoki) yang membawa kepada variasi impak terhadap taburan hujan di AT. Tiga episod super El Niño dengan ciri unik masing-masing telah dianalisis: 1982/83 (El Niño konvensional), 1997/98 (El Niño konvensional bersama IOD positif yang berpanjangan), dan 2015/16 (gabungan El Niño konvensional dan Modoki dengan IOD positif yang lemah). Kebaharuan kajian ini terletak pada analisis perbandingan tele-hubungan yang menyeluruh antara tiga peristiwa super El Niño dengan penekanan khusus corak hujan di kawasan AT. Hasil kajian menunjukkan bahawa keamatan, jenis El Niño dan gabungannya dengan IOD positif memainkan peranan penting dalam menentukan corak taburan hujan di AT. Selain itu, perbezaan interaksi lautan-atmosfera turut mempengaruhi tele-hubungan seterusnya mencetuskan keadaan signifikan sama ada kering atau basah di kawasan tertentu. Setiap tahun kajian menunjukkan perbezaan ketara akibat variasi jenis dan gabungan keragaman iklim yang terlibat. Impak kawasan signifikan kering dan basah juga berbeza mengikut musim. Semasa musim SON tahun 1997/98, kawasan AT mencatatkan impak negatif dengan anomali taburan hujan sekitar -2 mm/hari. Dapat dilihat keadaan kering signifikan semasa super El Niño tahun 1997/98 adalah lebih teruk berbanding 1982/83 dan 2015/16. Selain itu, El Niño Modoki semasa 2015/16 pula cenderung membawa lebih banyak hujan di AT berbanding El Niño konvensional. Namun, kesannya juga adalah kritikal iaitu terdapat laporan kes kematian dan kelesuan haba. Kekuatan magnitud angin, pembentukan sistem bertekanan tinggi anti-siklonik seterusnya membawa lembapan keluar dari rantau ini hampir menyamai keadaan semasa peristiwa tahun 1997/98. Kajian lanjut menggunakan data stesen dan model beresolusi tinggi dicadangkan untuk mengenal pasti lokasi yang terjejas secara khusus. Penyelidikan antara bidang seperti agrikultur, kesihatan awam dan keselamatan air turut disarankan dengan memberi tumpuan kepada kesan langsung semasa kejadian super El Niño berlaku.

PENGHARGAAN

Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia kerana telah membiayai penyelidikan ini melalui Geran Universiti Penyelidikan (GUP- 2021-042).

RUJUKAN

- Aminoto, T., Faqih, A., Koesmaryono, Y. & Dasanto, B.D. 2024. Rainfall anomaly response to ENSO and IOD teleconnections in the CORDEX-SEA simulations. Paper presented at the *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Amirudin, A.A., Salimun, E., Tangang, F., Juneng, L. & Zuhairi, M. 2020. Differential influences of teleconnections from the Indian and Pacific Oceans on rainfall variability in Southeast Asia. *Atmosphere* 11(9): 886.
- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H. & Yamagata, T. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research* 112(C11).
- Caesar, J., Alexander, L.V., Trewin, B., Tse-ring, K., Sorany, L., Vuniyayawa, V., Keosavang, N., Shimana, A., Htay, M.M., Karmacharya, J., Jayasinghearachchi, D.A., Sakkamart, J., Soares, E., Hung, L.T., Thuong, L.T., Hue, C.T., Dung, N.T.T., Hung, P.V., Cuong, H.D., Cuong, N.M. & Sirabaha, S. 2011. Changes in temperature and precipitation extremes over the Indo-Pacific region from 1971 to 2005. *International Journal of Climatology* 31(6): 791-801. doi:https://doi.org/10.1002/joc.2118
- Callahan, C.W. & Mankin, J.S. 2023. Persistent effect of El Niño on global economic growth. *Science* 380(6649): 1064-1069. doi:10.1126/science.adf2983
- Chaturvedi, S. & Mansi. 2022. Types of biomass burning in South East Asia and its impact on health. *EQA - International Journal of Environmental Quality* 50(1): 55-79. doi:10.6092/issn.2281-4485/15539
- Chen, L., Li, T., Wang, B. & Wang, L. 2017. Formation mechanism for 2015/16 super El Niño. *Scientific Reports* 7(1).
- Cui, L., Zhu, C., Zou, Z., Yao, C., Zhang, C. & Li, Y. 2023. The spatiotemporal characteristics of wildfires across Australia and their connections to extreme climate based on a combined hydrological drought index. *Fire* 6(2): 42.
- Dhungana, S., Shrestha, S., Pham van, T., Kc, S., Das Gupta, A. & Lai, T. 2022. Evaluation of gridded precipitation products in the selected sub-basins of Lower Mekong River Basin. *Theoretical and Applied Climatology* 151: 293-310.
- Doi, T., Behera, S.K. & Yamagata, T. 2020. Predictability of the super IOD event in 2019 and its link with El Niño Modoki. *Geophysical Research Letters* 47(7): e2019GL086713. doi:https://doi.org/10.1029/2019GL086713
- Fu, C., Diaz, H.F. & Fletcher, J.O. 1986. Characteristics of the response of sea surface temperature in the Central Pacific associated with warm episodes of the southern oscillation. *Monthly Weather Review* 114(9): 1716-1739.
- Hendon, H.H., Lim, E., Wang, G., Alves, O. & Hudson, D. 2009. Prospects for predicting two flavors of El Niño. *Geophys. Res. Lett.* 36(19): L19713.
- Hong, C.C. & Li, T. 2009. The extreme cold anomaly over Southeast Asia in February 2008: Roles of ISO and ENSO. *Journal of Climate* 22(13): 3786-3801.

- Hong, L.C., Lin, H. & Jin, F.F. 2014. A southern hemisphere booster of super El Niño. *Geophys. Res. Lett.* 41(6): 2142-2149.
- Huang, B., L'Heureux, M., Hu, Z-Z. & Zhang, H-M. 2016. Ranking the strongest ENSO events while incorporating SST uncertainty. *Geophys. Res. Lett.* 43(17): 9165-9172. doi:https://doi.org/10.1002/2016GL070888
- Iskandar, I., Lestrai, D.O. & Nur, M. 2019. Impact of El Niño and El Niño Modoki events on Indonesian rainfall. *Journal of Science* 23: 217-222.
- Juneng, L. & Tangang, F.T. 2005. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in Southeast Asia region and its relationship with atmosphere ocean variations in Indo-Pacific sector. *Climate Dynamics* 25(1): 337-350.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. & Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3): 437-472. doi:https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYR>2.0.CO;2
- Kao, H-Y. & Yu, J-Y. 2009. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *Journal of Climate* 22(3): 615-632. doi:https://doi.org/10.1175/2008JCLI2309.1
- Kemarau, R. A., Boo, W. H., Sakawi, Z., Dambul, R., Suab, S. A., Jaafar, W. S. W. M., . . . Norzin, M. A. F. 2024. Impact of El Niño, Indian Ocean dipole, and Madden-Julian oscillation on land surface temperature in Kuching City Sarawak, during the periods of 1997/1998 and 2015/2016: a pilot study. *Journal of Water and Climate Change* 15(8) 3702-3723.
- Khadka, D., Babel, M.S., Abatan, A.A. & Collins, M. 2022. An evaluation of CMIP5 and CMIP6 climate models in simulating summer rainfall in the Southeast Asian monsoon domain. *International Journal of Climatology* 42(2): 1181-1202. doi:10.1002/joc.7296
- Kim, J-W. & An, S-I. 2018. Origin of early-spring central Pacific warming as the 1982-1983 El Niño precursor. *International Journal of Climatology* 38(6): 2899-2906.
- Kogan, F. & Guo, W. 2017. Strong 2015-2016 El Niño and implication to global ecosystems from space data. *International Journal of Remote Sensing* 38(1): 161-178. doi:10.1080/01431161.2016.1259679
- Kug, J-S., Jin, F-F. & An, S-I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate* 22(6): 1499-1515. doi:https://doi.org/10.1175/2008JCLI2624.1
- Kurniadi, A., Weller, E., Kim, Y.H. & Min, S.K. 2022. Evaluation of CMIP6 model-simulated extreme precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology* 43: 174-196.
- Lim, Y-K., Kovach, R.M., Pawson, S. & Vernieres, G. 2017. The 2015/16 El Niño event in context of the MERRA-2 reanalysis: A comparison of the tropical pacific with 1982/83 and 1997/98. *Journal of Climate* 30(13): 4819-4842.
- Lin, J. & Qian, T. 2019. A new picture of the global impacts of El Nino-southern oscillation. *Scientific Reports* 9(1): 17543. doi:10.1038/s41598-019-54090-5
- Liu, L., Yang, G., Zhao, X., Feng, L., Han, G., Wu, Y. & Yu, W. 2017. Why was the Indian Ocean Dipole weak in the context of the extreme El Niño in 2015? *Journal of Climate* 30(12): 4755-4761. doi:https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0281.1
- Liu, Y., Cai, W., Lin, X., Li, Z. & Zhang, Y. 2023. Nonlinear El Niño impacts on the global economy under climate change. *Nature Communications* 14: 58-87. doi:https://doi.org/10.1038/s41467-023-41551-9
- Luo, J-J., Zhang, R., Behera, S.K., Masumoto, Y., Jin, F-F., Lukas, R. & Yamagata, T. 2010. Interaction between El Niño and extreme Indian Ocean Dipole. *Journal of Climate* 23(3): 726-742. doi:https://doi.org/10.1175/2009JCLI3104.1
- Meyers, G., McIntosh, P., Pigot, L. & Pook, M. 2007. The years of El Niño, La Niña, and interactions with the tropical Indian Ocean. *Journal of Climate* 20(13): 2872-2880. doi:https://doi.org/10.1175/JCLI4152.1
- Murtugudde, R., McCreary Jr, J.P. & Busalacchi, A.J. 2000. Oceanic processes associated with anomalous events in the Indian Ocean with relevance to 1997-1998. *J. Geophys. Res.* 105(C2): 3295-3306. doi:https://doi.org/10.1029/1999JC900294
- Nguyen-Le, D., Ngo-Duc, T. & Matsumoto, J. 2024. The teleconnection of the two types of ENSO and Indian Ocean Dipole on Southeast Asian autumn rainfall anomalies. *Climate Dynamics* 6: 1-23.
- Nguyen-Thanh, H., Ngo-Duc, T. & Herrmann, M. 2023. The distinct impacts of the two types of ENSO on rainfall variability over Southeast Asia. *Climate Dynamics* 61(5): 2155-2172. doi:10.1007/s00382-023-06673-2
- Nur'utami, M.N. & Hidayat, R. 2016. Influences of IOD and ENSO to Indonesian rainfall variability: Role of atmosphere-ocean interaction in the Indo-pacific sector. *Procedia Environmental Sciences* 33: 196-203. doi:https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.070
- Paek, H., Yu, J-Y. & Qian, C. 2017. Why were the 2015/2016 and 1997/1998 extreme El Niños different? *Geophys. Res. Lett.* 44(4): 1848-1856.

- Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N. & Yamagata, T. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature* 401(6751): 360-363. doi:10.1038/43854
- Salimun, E., Tangang, F., Juneng, L., Behera, S.K. & Yu, W. 2014. Differential impacts of conventional El Niño versus El Niño Modoki on Malaysian rainfall anomaly during winter monsoon. *Int. J. Climatol.* 34(8): 2763-2774.
- Santoso, A., Mcphaden, M.J. & Cai, W. 2017. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics* 55(4): 1079-1129. doi:https://doi.org/10.1002/2017RG000560
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B. & Ziese, M. 2011. *GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 1.0°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html/fulldata_v6_download.html
- Sri Nurdianti, Fahren Bukhari, Muhammad Tito Julianto, Ardhasena Sopaheluwakan, Mega Aprilia, Ibnu Fajar, Pandu Septiawan & Mohamad Khoirun Najib. 2022. The impact of El Niño southern oscillation and Indian Ocean Dipole on the burned area in Indonesia. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 33: 16. doi:10.1007/s44195-022-00016-0
- Suhaila, J., Deni, S.M., Zin, W.W. & Jemain, A.A. 2010. Trends in Peninsular Malaysia rainfall data during the southwest monsoon and northeast monsoon seasons: 1975-2004. *Sains Malaysiana* 39(4): 533-542.
- Supari, Tangang, F., Salimun, E., Aldrian, E., Sopaheluwakan, A. & Juneng, L. 2018. ENSO modulation of seasonal rainfall and extremes in Indonesia. *Climate Dynamics* 51(7): 2559-2580. doi:10.1007/s00382-017-4028-8
- Tangang, F. 2010. *Climate Change: Is Southeast Asia up to the Challenge?: The Roles of Climate Variability and Climate Change on Smoke Haze Occurrences in Southeast Asia Region*. LSE IDEAS: http://eprints.lse.ac.uk/id/eprint/43571
- Tangang, F., Farzanmanesh, R., Mirzaei, A., Supari, Salimun, E., Jamaluddin, A. F., & Juneng, L. 2017. Characteristics of precipitation extremes in Malaysia associated with El Niño and La Niña events. *International Journal of Climatology* 37(S1): 696-716.
- Tangang, F., Juneng, L., Salimun, E., & Jamaluddin, A. 2019. Scientific understanding of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and its climatic impacts in Malaysia and surrounding region. In pp. 5-31: Academy of Sciences Malaysia.
- Thirumalai, K., DiNezio, P.N., Okumura, Y. & Deser, C. 2017. Extreme temperatures in Southeast Asia caused by El Niño and worsened by global warming. *Nature Communications* 8(1): 15531.
- Wang, C. & Wang, X. 2013. Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in Southern China and typhoon tracks. *Journal of Climate* 26(4): 1322-1338. doi:https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00107.1
- Yu, L. & Rienecker, M.M. 1999. Mechanisms for the Indian Ocean warming during the 1997-98 El Niño. *Geophysical Research Letters* 26(6): 735-738. doi:https://doi.org/10.1029/1999GL900072
- Zhang, F.M., Qu, X.H. & Ye, S.H. 2009. Uncertainty analysis in large-scale measurement based on Monte Carlo simulation method. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS* 15(1): 184-187, 196.

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