KARAKTERISTIK DAN TREN PERUBAHAN SUHU PERMUKAAN LAUT DI INDONESIA PERIODE 1982-2009

THE CHARACTERISTIC AND TREND OF SEA SURFACE TEMPERATURE OVER INDONESIA IN 1982-2009

Muhammad Najib Habibie* dan Tri Astuti Nuraini
Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jakarta
**e-mail : najib.habibie@bmkg.go.id*

Naskah masuk: 3 Maret 2014; Naskah diperbaiki: 22 Agustus 2014; Naskah diterima: 10 September 2014

ABSTRAK

Suhu permukaan laut (SPL) merupakan komponen penting yang dapat mengendalikan cuaca dan iklim di wilayah Indonesia. Seiring dengan adanya isu perubahan iklim yang ditandai dengan peningkatan suhu global, maka SPL disinyalir juga berubah. Pada penelitian ini dikaji tentang karakteristik dan tren perubahan SPL di wilayah Indonesia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui ada tidaknya perubahan SPL di wilayah Indonesia. Untuk itu dianalisa data SPL selama 28 tahun (1982-2009) dengan metode Mann-Kendall test. Domain yang digunakan adalah 15°LU- 15°LS, 90°BT-145°BT. Berdasarkan hasil penelitian ini diperoleh bahwa karakteristik siklus SPL di wilayah Indonesia berhubungan erat dengan siklus monsun yang bertiup di wilayah ini dimana pada periode monsun Asia SPL di wilayah utara lebih hangat sebaliknya pada periode monsun Australia, di selatan yang lebih hangat dan di sekitar ekuator mengalami SPL paling hangat pada periode peralihan. Secara umum di wilayah Indonesia terutama di *inner sea* terjadi tren peningkatan SPL dengan probabilitas > 95%. Daerah *inlet* Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) dan *South Equatorial Current* yang meliputi perairan sekitar Biak, Selat Makassar, Halmahera, dan Laut Banda, pada umumnya mengalami tren peningkatan SPL yang paling tinggi dibandingkan wilayah sekitarnya dengan peningkatan mencapai 0,5-1,1 °C pada periode DJF. Pada masa peralihan dan musim kemarau, hanya di Pasifik bagian barat yang mengalami tren meningkat.

Kata kunci: Suhu Permukaan Laut (SPL), tren, Mann-Kendall test, ARLINDO, monsun

ABSTRACT

Sea Surface Temperature (SST) is important factor on weather and climate regulation over Indonesia. According to the climate change issue which is characterized by increasing global temperatures, the SST was allegedly increased too. The purpose of this study was to determine the existence of the SST change over Indonesia. Mann-Kendall test used to analyze 28 years (1982-2009) SST data. The domain of this research is 15° N-15° S, 90° E-145° E. The result of this research shows that increasing trend of SST occurring over Indonesia waters. It was found that the characteristic of SST in Indonesia is correlated with monsoon system, whereas in the Asian summer monsoon, the SST of the northern region is warmer. Contrary, in the Australian summer monsoon, the SST of southern region is warmer. The SST of equator region is warmest in the transition period. In general, Indonesia's waters experiencing an increasing trend of SST with a probability over 95%. The Indonesian throughflow and South Equatorial Current on western part of Pacific Ocean covering Biak waters, Makassar Strait, Halmahera, and Banda Sea generally experiencing the highest increasing trend of SST compared with other area between 0.5 to 1.1°C. In the transitional period and dry season, the SST over Indonesia, largely unchanged, except in the western Pacific.

Keywords*: Sea Surface Temperature (SST), trend, Mann-Kendall test, Indonesian Throughflow, monsoon*

1.Pendahuluan

Luas laut Indonesia mencapai 5,8 juta km^2, atau mendekati 62% dari luas keseluruhan negara Indonesia. Keadaan ini mengakibatkan iklim di wilayah Indonesia dikendalikan oleh iklim laut di sekitarnya. Pada kenyataannya iklim di wilayah Jawa dan pulau-pulau besar lainnya mewakili iklim maritim dan bukan iklim benua[1]. Berkembangnya isu perubahan iklim akibat pemanasan global dan adanya variabilitas iklim yang mempunyai dampak signifikan pada kehidupan manusia akhir-akhir ini, menimbulkan pertanyaan apakah fenomena tersebut menyebabkan perubahan pada iklim laut. Penelitian ini sangat penting dilakukan karena perubahan yang ada di laut akan berpengaruh juga di daratan, terutama daerah pesisir. Zona pesisir Indonesia menopang kehidupan sekitar 60% dari lebih dari 240 juta penduduk

Indonesia. Oleh karena itu adanya pemahaman tentang perubahan iklim terutama suhu muka laut, akan meningkatkan pemahaman tentang perubahan iklim beserta dampak yang di timbulkan.

Pada penelitian ini akan dikaji perubahan suhu permukaan laut / *Sea Surface Temperature* (SST) selama 28 tahun dari 1982-2009. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah dalam kurun waktu tersebut terjadi perubahan SPL di wilayah Indonesia. Perubahan SPL berpengaruh terhadap perubahan *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ) yang akan menyebabkan perubahan musim dari normalnya. Pola hujan juga sensitif terhadap perubahan anomali SPL. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa anomali SPL telah memengaruhi variasi hujan di subkontinen Afrika[2] serta kecepatan pembentukan badai[3].

Di Atlantik, SPL berpengaruh terhadap kejadian badai, pencairan es dan kekeringan. Salah satu pertanda adanya perubahan iklim di Atlantik Utara telah ditemukan yaitu bertambahnya frekuensi *hurricane* dan pencairan es di Greenland. Kedua fenomena tersebut terjadi ketika di Atlantik Utara terjadi pemanasan SPL secara signifikan. Penelitian terakhir menunjukkan bahwa kejadian tersebut berhubungan dengan pemanasan global [4]. Beberapa proses yang berpotensi dapat menimbulkan variabilitas SPL meliputi perubahan dalam pembentukan awan, penguapan, efek angin lokal, perubahan transport panas pada inter dan intrahemisfer. Efek variasi dari kehilangan panas laten dari permukaan laut merupakan mekanisme yang penting dalam perubahan SPL[2]. Faktor lain yang memengaruhi SPL adalah arus, gelombang, gerakan konveksi, upwelling, divergensi, pembekuan dan pencairan es di daerah kutub [5].

Meteorologis telah lama mengamati permukaan laut terutama SPL sebagai kandidat utama yang menimbulkan perubahan atmosfer frekuensi rendah. Pemahaman akan hubungan laut dan atmosfer bukan hanya penting dalam pemahaman sistim iklim, tetapi juga menjangkau implikasi praktis yang lebih luas yaitu dalam pediksi cuaca dan iklim, dari simulasi variabilitas sistem iklim interdekadal menunjukkan adanya hubungan yang erat antara laut dan atmosfer[6,7].

Kondisi permukaan laut di daerah tropis umumnya hangat dengan variasi suhu tahunan rendah. Kondis ini akan berpengaruh terhadap aktivitas konveksi yang tinggi. Sedangkan laut merupakan sumber uap air utama untuk segala proses yang ada di atmosfer. Daerah tropis menjadi penting pada sistem iklim global karena pemanasan yang kuat dan terungkapnya fluktuasi iklim jangka waktu tahunan maupun interdekadal yang dapat memengaruhi iklim global serta berdampak sosioekonomi pada daerah tersebut atau wilayah yang lebih luas. Sebagai contoh variasi iklim di daerah tropis dapat berdampak sampai Amerika Utara[8]. Oleh sebab itu perubahan iklim yang terjadi pada daerah tropis akan menyebabkan perubahan pada daerah yang lebih luas lagi.

Salah satu akibat adanya perubahan SPL di daerah tropis yang telah diteliti yaitu berubahnya curah hujan yang ada di wilayah Sahel (sub Sahara, Afrika). Diperkirakan curah hujan di Sahel berkurang sekitar 35% sejak tahun 1950. Tren kekeringan di Sahel yang mencolok ini terungkap dari tahun 1950-1985 dan dari tahun 1985 sampai sekarang wilayah ini sangat lambat untuk pulih kembali. Gianni et al 2003 dalam Chung & Ramanathan[9], menjelaskan bahwa kejadian ini dipicu oleh adanya pemanasan SPL di ekuatorial Samudera Hindia dan Atlantik yang merupakan *trigger* untuk penurunan curah hujan di Sahel. Penelitian lain menyebutkan bahwa tren pemanasan SPL di Atlantik merupakan faktor utama penyebab kekeringan di Sahel. Hal ini menunjukkan bahwa daerah ekuator merupakan daerah yang penting dalam mengendalikan cuaca dan iklim di wilayah lain.

Monsun Asia dan Afrika diketahui berhubungan, sirkulasi monsun Asia Selatan berakibat sangat besar terhadap lintasan monsun Afrika Utara pada troposfer atas dan tengah yang melintasi Samudera Hindia. Variasi monsun Asia akan berakibat pada bervariasinya hujan di Afrika Utara[9]. Perubahan SPL di Samudera Hindia tentunya akan menyebakan bervariasinya lintasan monsun ini sehingga akan berpengaruh terhadap variasi hujan di kedua tempat.

Perubahan SPL dapat memengaruhi pola curah hujan pada suatu tempat. Dari analisa curah hujan tahun 1955-2005 ditemukan tren penurunan curah hujan serta tren penurunan kekuatan dan dominasi monsun. Hal ini menyebabkan perubahan pola hujan tahunan yaitu peningkatan curah hujan di musim hujan serta peningkatan periode musim kering atau ketidakseimbangan pola tahunan. Perubahan ini menyebabkan peningkatan ancaman kekeringan di musim kemarau dan cuaca ekstrim di musim hujan. Mei dan Desember curah hujan telah menurun secara signifikan selama lima dekade terakhir seperti yang ditunjukkan oleh terus meningkatnya daerah dengan jumlah curah hujan yang rendah . Dengan membandingkan time series dari data curah hujan di dua lokasi, daerah pegunungan dan pesisir, ditemukan bahwa periode kering telah meningkat, terutama di daerah ketinggian rendah[10]. Mengingat SPL berimplikasi terhadap berbagai aspek yang berhubungan dengan cuaca dan ikim, maka penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan. Dalam penelitian ini difokuskan pada perubahan SPL di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Dalam kajian ini digunakan data SPL yang mencakup domain 15°LU- 15°LS, 90°BT-145°BT, data diakses dari *The Integrated Global Ocean Services System* (IGOSS) yang mengoleksi dan mendistribusikan data suhu permukaan laut, salinitas, sea level dan arus. Data IGOSS merupakan akuisisi dari berbagai data dan sistem manajemen lain, Data IGOSS reanalisis dapat diakses dari *http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/* [11]. Data yang dipakai yaitu data bulanan dari bulan Januari sampai Desember tahun 1982-2009 (28 tahun).

Tren linear dan Mann-Kendall test telah diaplikasikan dalam mengkaji perubahan suhu permukaan laut. Mann-Kendall test adalah uji non-parametrik untuk mendeteksi trend pada data *time series*. Uji ini membandingkan besaran relatif dari data sampel[12]. Salah satu manfaat dari uji ini adalah bahwa data tidak perlu disesuaikan pada setiap distribusi tertentu. Nilai data dievaluasi sebagai *orde time series.* Setiap data dibandingkan dengan semua data berikutnya.

Rumus Mann-Kendall statistik ditunjukkan sebagai berikut:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n-1} sign(x_j - x_k) \qquad ...(1)$$

dimana:

$$sign(x_j - x_k) \quad = 1 \quad \text{jika} \quad x_j - x_k > 0$$
$$= 0 \quad \text{jika} \quad x_j - x_k = 0$$
$$= -1 \quad \text{jika} \quad x_j - x_k < 0$$

Nilai S positif yang sangat tinggi merupakan indikator tren meningkat, dan nilai negatif sangat rendah menunjukkan tren menurun. Namun, masih dibutuhkan penghitungan probabilitas, nilai S dan ukuran sampel, n, untuk mengukur signifikansi statistik dari tren. Untuk perhitungan probabilitas digunakan langkah-langkah sebagai berikut:

Perhitungan varian S

$$VAR(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{g} t_p\,(t_p-1)(2t_p+5)\right]$$

...(2)

Dimana n adalah data ke-n, g adalah urutan kelompok tertentu (di mana masing-masing anggotanya memiliki yang sama) dan t_p adalah urutan data pada p.

Untuk menghitung uji normalitas data, digunakan rumus sebagai berikut:

$$Z = \frac{S-1}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad \text{jika S} > 0$$
$$= 0 \quad \text{jika S} = 0$$
$$= \frac{S+1}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad \text{jika S} < 0 \qquad ...(3)$$

Penghitungan probabilitas kemudian digabungkan dengan uji normalitas. Fungsi probabilitas pada distribusi normal dengan rata-rata 0 dan standar deviasi 1 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{z^2}{2}} \qquad ...(4)$$

Derajat tingkat kepercayaan (*significant level*) yang dipakai adalah 95%. Trend dikatakan menurun jika Z adalah negatif dan probabilitas lebih besar dari *significant level*. Trend dikatakan meningkat jika Z adalah positif dan nilai probabilitas lebih besar dari *significant level*. Jika probabilitasnya kurang dari *significant level*, maka tidak ada tren (*no trend*).

3. Hasil dan Pembahasan

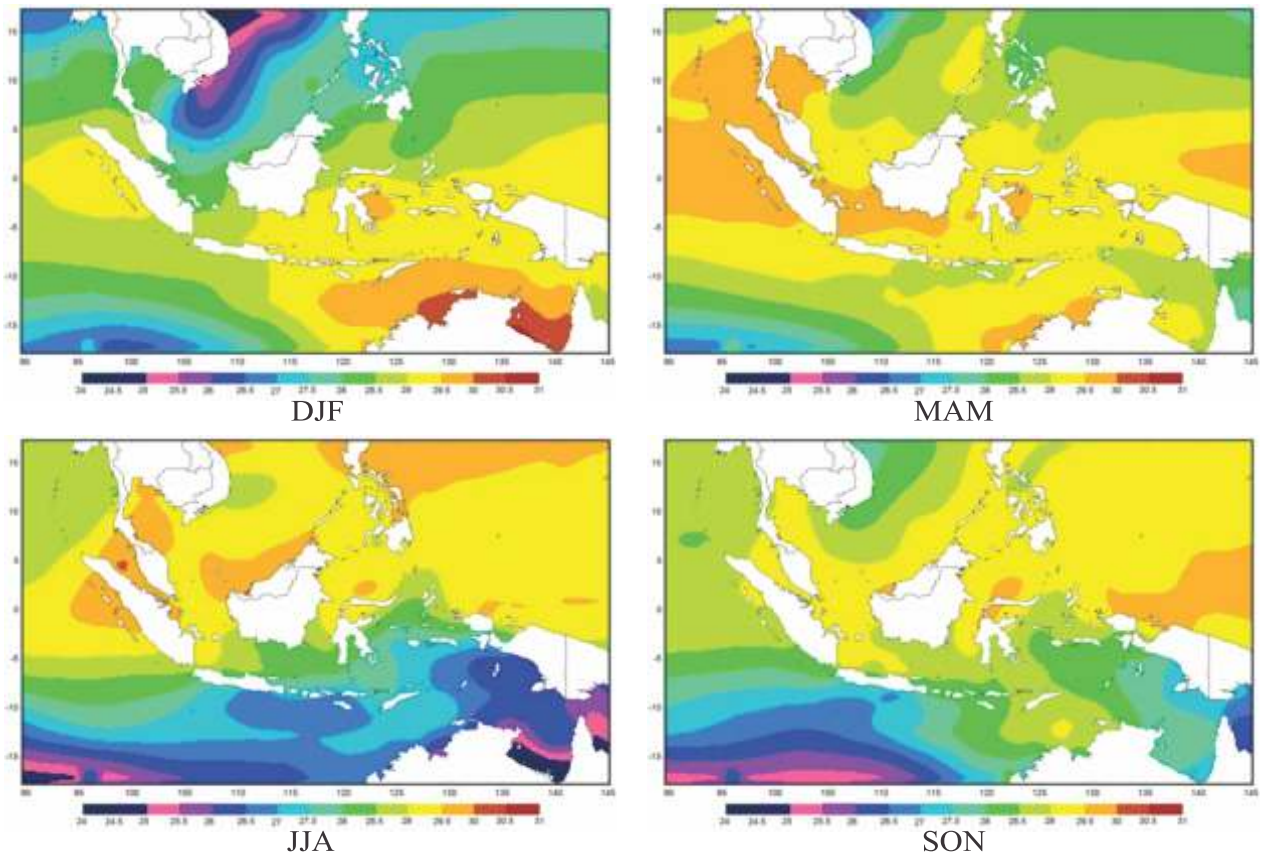
Karakteristik SPL di wilayah Indonesia yang dianalisa secara musiman berdasarkan perata-rataan selama 28 tahun mulai tahun 1982-2009 ditampilkan pada Gambar 1. Distribusi SPL di wilayah Indonesia berhubungan erat dengan siklus monsun di mana terlihat pada bulan DJF, SPL di bumi belahan selatan (BBS) cenderung lebih hangat dibandingkan bumi belahan utara (BBU). Hal ini bertepatan dengan aktifnya monsun Asia dan posisi matahari berada di BBS. SPL di wilayah Indonesia pada bulan DJF berkisar antara 28-29,5 °C dan untuk wilayah BBS relatif lebih hangat dibanding BBU. Sebaliknya pada bulan JJA yang bertepatan dengan periode monsun Australia, wilayah BBS lebih dingin dibandingkan dengan BBU. Matahari saat itu berada di BBU sehingga atmosfernya cenderung lebih hangat, hal ini diikuti oleh menghangatnya SPL di BBU. SPL pada bulan ini tertinggi di sebagian Selat Malaka yang mencapai 30,5 °C, sedangkan wilayah sekitarnya yaitu sepanjang pantai timur Sumatera dan pantai barat Sumatera yang meliputi Padang sampai Aceh memiliki suhu 30 °C. Sebaliknya di sebelah selatan yang meliputi laut Jawa, dan selatan Jawa memiliki suhu 27-27,5 °C, dan terendah di Laut Arafura yang mencapai 26,5 °C.

Pada musim peralihan sebaran SPL di wilayah Indonesia hampir merata, tidak ada perbedaan mencolok antara BBU dan BBS, berkebalikan dengan kondisi saat periode monsun. Secara umum pada periode MAM, SPL wilayah Indonesia paling hangat dibandingkan periode yang lain. SPL pada periode ini berkisar antara 29-30 °C. Wilayah yang paling hangat

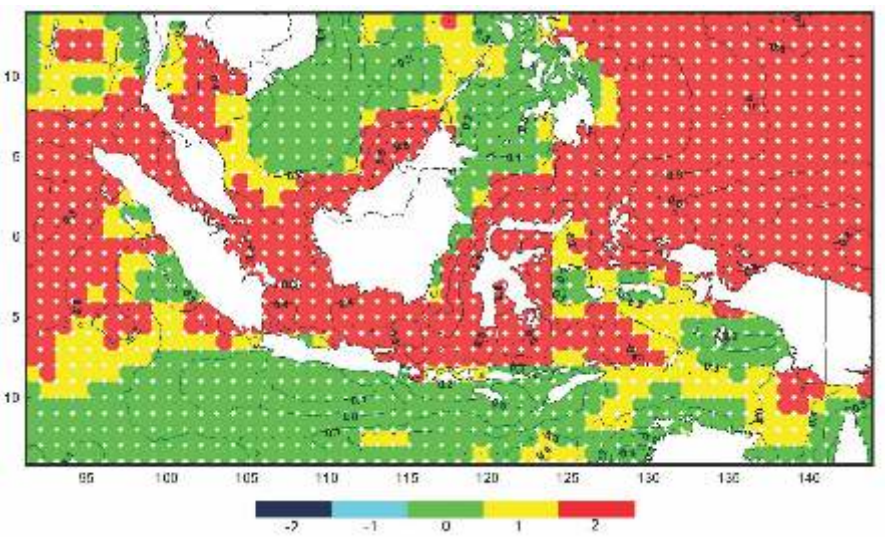
meliputi pantai barat Sumatera, Selat Malaka, Selat Karimata, Laut Jawa bagian utara dan perairan sekitar Kendari. Pada periode SON, SPL wilayah Indonesia lebih dingin dibandingkan periode MAM dengan suhu berkisar 28-29,5 °C, hanya sebagian kecil wilayah yang mempunyai SPL 30 °C yaitu perairan Sulawesi dan Pasifik barat sekitar Biak.

Analisa signifikan tren dan linear tren data SPL wilayah Indonesia tahun 1982-2009 dapat dilihat pada Gambar 2. Dalam analisa tren ini digunakan lima klasifikasi sebagai berikut:

a. 2 = mengalami tren peningkatan suhu dengan tingkat probabilitas ≥95%
b. 1 = kemungkinan mengalami trend meningkat (probabilitas 90 - 95%)
c. 0 = tidak mengalami tren (*no trend*/ probabilitas ≤90 %)
d. -1 = kemungkinan mengalami trend turun (probabilitas 90 - 95%)
e. -2 = mengalami tren penurunan suhu dengan tingkat probabilitas ≥95%



Gambar 1. Pola SPL musiman di wilayah Indonesia berdasarkan data tahun 1982-2009



Gambar 2. Peta tren (garis kontur) dan signifikan tren (warna) SPL wilayah Indonesia tahun 1982-2009.

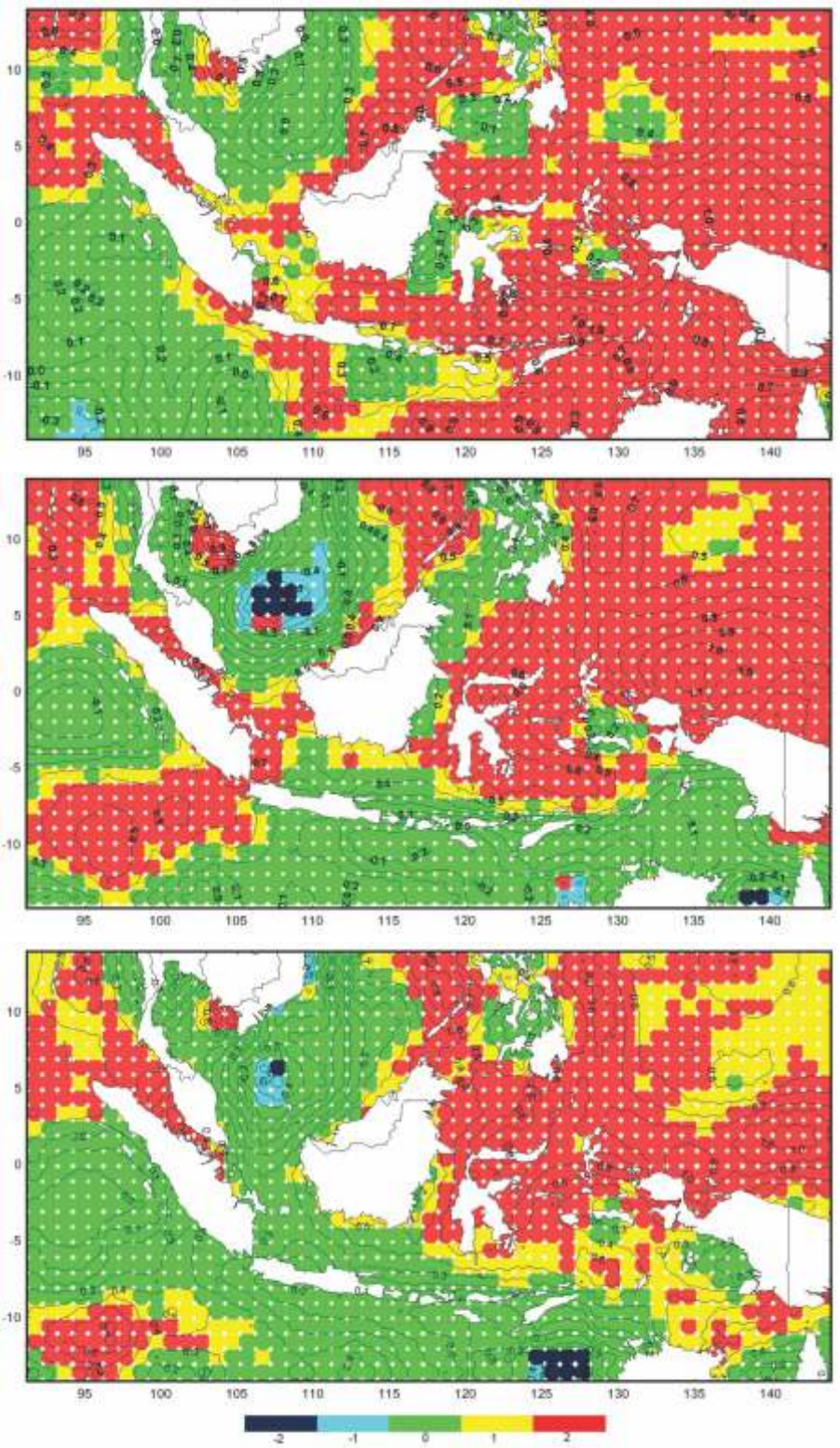
Secara umum dari tahun 1982-2009 kondisi suhu permukaan laut (SPL) di wilayah Indonesia mengalami tren peningkatan suhu dengan proabilitas ≥ 95%, kecuali di Samudera Hindia sebelah selatan Jawa sampai Laut Timor, sebagian Laut Arafura dan sebagian Laut Ambon yang tidak mengalami tren (*no trend*). Laut Jawa, Selat Malaka, Selat Karimata, Selat Makassar, Laut Sulawesi, Laut Banda, perairan sekitar Maluku dan Samudera Pasifik bagian barat terindikasi mengalami tren peningkatan SPL. Samudera Pasifik bagian barat merupakan wilayah yang mengalami tren peningkatan SPL paling tinggi dengan nilai linear tren antara 0,6-0,8 °C. Wilayah lain yang mengalami tren SPL meningkat dengan nilai peningkatan 0,5 °C meliputi Laut Jawa bagian timur, Laut Bone, Masalembo dan Selat Makassar. Sedangkan wilayah lain seperti Laut Jawa bagian barat, Selat Karimata dan Laut Banda mengalami peningkatan SPL sebesar 0,4 °C. Jalur yang dilalui Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) seperti Selat Makassar, Laut Banda, dan Selat Lombok terindikasi mengalami tren SPL meningkat. Hal ini terjadi akibat adanya aliran massa air dari Samudera Pasifik bagian barat yang juga mengalami tren peningkatan SPL paling tinggi.

Pemanasan SPL di Samudera Hindia telah diketahui berdasarkan berbagai penelitian terkini. Kondisi Samudera Hindia dari tahun 1900-1983 pada saat musim dingin di sebelah utara menunjukkan tren memanas. Dominiak 2005 dalam Ihara, Kushnir, & Cane[13] menunjukkan bahwa seluruh Samudera Hindia menunjukkan pemanasan yang kuat setelah tahun 1976-1977. Perubahan ini mungkin sebagai bagian dari variasi natural, ataupun merupakan manifestasi lokal akibat pemanasan global yang disebabkan oleh gas rumah kaca dan aerosol akibat aktivitas manusia.

Pada bulan Desember, umumnya perairan di wilayah Indonesia mengalami tren peningkatan SPL dengan probabilitas ≥ 95%. Hampir seluruh wilayah perairan terutama dari Laut Jawa bagian tengah ke timur mengalami tren peningkatn suhu permukaan laut. Sebagian besar peningkatan tren masuk kedalam kelompok a. Peningkatan tren paling tinggi meliputi perairan Wakatobi, Laut Banda, Laut Arafura, dan Samudera Pasifik bagian barat. Di perairan Indonesia bagian barat, tren peningkatan SPL terindikasi di Selat Malaka, Selat Sunda, sebagian Selat Karimata, Samudera Hindia selatan Jawa sampai Pacitan. Perairan sebelah utara Kalimantan menjalar ke utara sampai perairan Filipina juga mengalami tren peningkatan SPL. Daerah-daerah yang mengalami linear tren paling tinggi di bulan Desember meliputi Samudera Pasifik sebelah barat (Halmahera dan Biak) dengan nilai 0,8-1 °C, perairan Wakatobi dengan nilai 0,8-0,9 °C, serta Laut Banda dan Laut Arafura dengan nilai 0,8-1 °C. Sedangkan untuk Laut Jawa tren peningkatan SPL tertinggi terjadi di Selat Sunda dengan nilai 0,7°C.

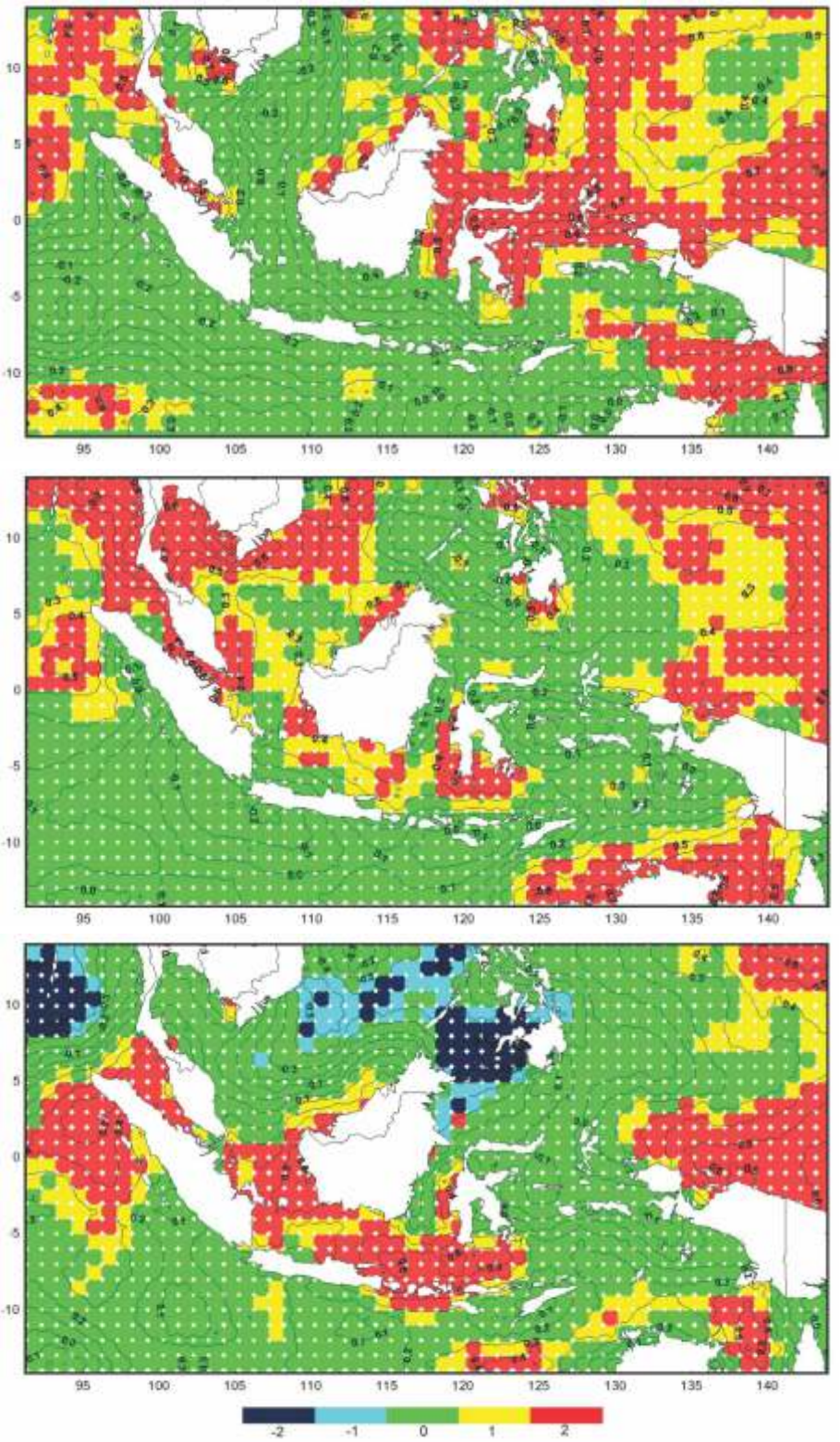
Signifikan tren SPL pada bulan Januari berbeda dibandingkan degan bulan Desember, sebagian besar Laut Jawa, Laut Banda, Laut Arafura dan Laut Ambon yang sebelumnya mengalami tren meningkat, tidak mengalami perubahan (*no trend*) pada bulan ini. Sebaliknya di sepanjang pantai timur Sumatera dan sebagian Selat Karimata yang sebelumnya masuk dalam kelompok b, pada bulan ini mengalami tren peningkatan SPL dengan probabilitas 90-95% (kelompok a). Pada bulan ini terdapat tren penurunan SPL di Laut Cina Selatan sebesar 0,3-0,6 °C dan Teluk Carpentaria disebelah selatan. Dari linear tren terlihat bahwa di Pasifik Barat terjadi peningkatan yang paling tinggi yaitu antara 0,7-1,1 °C. Sedangkan wilayah lain yang mengalami peningkatan relatif tinggi antara 0,5-0,7 °C yaitu Laut Sulawesi, Laut Banda, Selat Sunda dan Selat Malaka.

Signifikan tren SPL pada bulan Februari mempunyai pola tren meningkat di perairan yang berbatasan dengan Samudera Pasifik bagian barat, tren meningkat dengan probabilitas >95% terjadi di Laut Sulawesi, Halmahera, Biak, sebagian Laut Banda, dan perairan sebelah timur Papua. Sedangkan di wilayah barat tren terlihat meningkat di Selat Malaka. Samudera Hindia yang berbatasan dengan wilayah Indonesia, Selat Karimata dan Laut Jawa, mengalami *no trend* atau tidak mengalami perubahan. Nilai linear tren paling tinggi terjadi di Samudera Pasifik bagian barat dengan nilai 0,6-1 °C. Laut Sulawesi dan Laut Ambon juga terlihat meningkat sebesar 0,5-0,8 °C. Dan di Selat Makassar mengalami peningkatan antara 0,4-0,6 °C.



Gambar 3. Peta tren dan signifikan tren SPL wilayah Indonesia bulan Desember, Januari dan Februari tahun 1982- 2009.

Pada bulan Maret, daerah yang mengalami tren peningkatan SPL adalah Selat Makassar, Halmahera, Laut Arafura, sebagian Laut Banda, Samudera Pasifik bagian barat dan Selat Malaka. Pada bulan ini Laut Jawa dan Selat Krimata tidak mengalami tren (*no trend*), begitu juga Samudera Hindia. Di Selat Malaka, peningkatan SPL berkisar antara 0,2 – 0,5 °C, di Selat Makassar 0,4 – 0,8 °C, di laut Arafura dan Laut Banda berkisar antara 0,3 – 0,6 °C, sedangkan di Samudera Pasifik bagian barat dan perairan Maluku peningkatannya sebesar 0,6 – 0,8 °C. Kondisi SPL pada bulan April cenderung stabil, hanya sebagian kecil perairan wilayah Indonesia yang mengalami tren peningkatan SPL, yaitu Selat Malaka yang menjalar ke utara sampai Teluk Siam dan Laut Andaman, Teluk Bone, sebagian Selat Makassar bagian selatan dan Biak. Peningkatan SPL di Selat Malaka mencapai 0,4 – 0,5 °C, dan Makassar antara 0,4-0,5 °C.

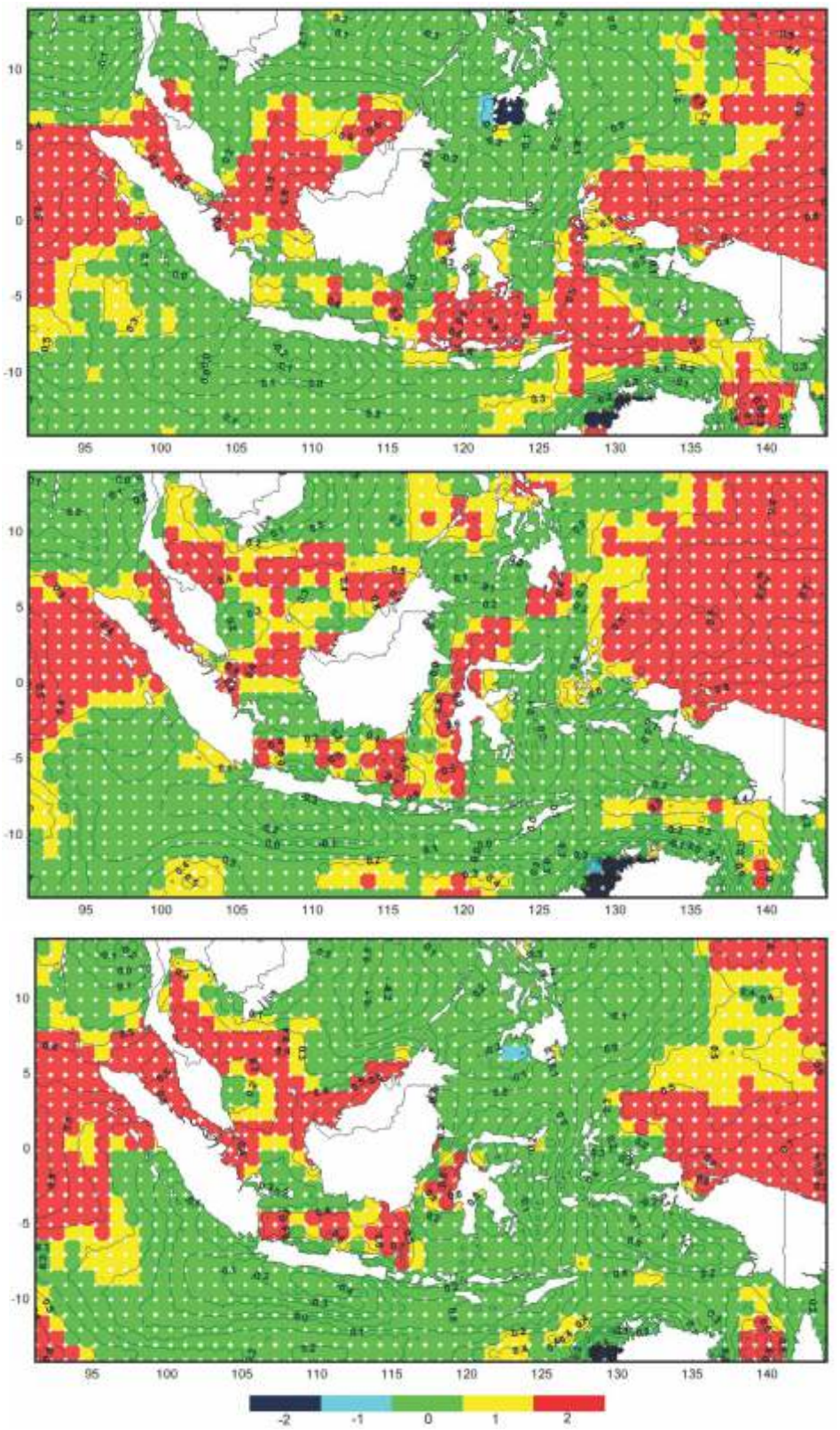


Gambar 4. Peta tren dan signifikan tren SPL wilayah Indonesia bulan Maret, April dan Mei tahun 1982-2009.

Berbeda dengan bulan sebelumnya, pada bulan Mei Selat Karimata dan Laut Jawa mengalami tren peningkatan SPL dengan probabilitas > 95%, Selat Malaka dan perairan sekitar Biak juga mengalami hal yang sama. Sebaliknya Laut Sulu dan Laut Andaman mengalami penurunan tren SPL. Peningkatan suhu yang terjadi di Laut Jawa berkisar 0,5 – 0,6 °C. Samudera Pasifik bagian barat mengalami peningkatan suhu sebesar 0,4 - 0,6 °C, sedangkan di Laut Sulu dan Andaman penurunan suhunya sebesar -0,4 - -0,6 °C.

Pada bulan Juni, daerah yang mengalami trend peningkatan SPL meliputi Selat Malaka, Sumatera bagian utara, Selat Karimata, Laut Banda, dan Samudera Pasifik sebelah utara Papua. Tren

penurunan SPL terjadi di Laut Sulu (Filipina). Peningkatan SPL sekitar utara Nusa Tenggara berkisar 0,5 – 0,6 ºC, Samudera Pasifik utara Papua mengalami peningkatan SPL sebesar 0,4 -0,8 ºC, Sumatera bagian utara mengalami peningkatan SPL sebesar 0,4 – 0,6 ºC, dan juga Selat Karimata berkisar 0,4 – 0,5. Penurunan SPL terjadi di sekitar Filipina dengan nilai sebesar -0,1 - -0,3 ºC dan di Samudera Hindia sebelah selatan Jawa sebesar --01 - 0,2 ºC.



Gambar 5. Peta tren dan signifikan tren SPL wilayah Indonesia bulan Juni, Juli dan Agustus tahun 1982-2009.

Sama halnya dengan bulan Juni, beberapa daerah mengalami tren peningkatan SPL, yaitu di Samudera Pasifik bagian barat dan sebelah barat ujung pulau Sumatera dan Selat Makassar. Di Samudera Hindia sebelah selatan Pulau Jawa umumnya masih tidak mengalami trend peningkatan maupun penurunan suhu permukaan laut (*no trend*), sedangkan sebagian Laut Jawa mulai mengalami tren peningkatan suhu terutama di sebelah utara Madura, Bali sampai sebelah selatan Banjarmasin.

Peningkatan SPL berdasarkan linear tren masih terjadi di Samudera Pasifik sebelah utara Papua, yaitu berkisar 0,4 – 0,7, di Selat Makassar 0,4 – 0,6, di Samudera Hindia sebelah Barat ujung Sumatera peningkatannya sebesar 0,3 – 0,5, serta di sebelah utara Madura, Bali sampai sebelah selatan Banjarmasin juga mengalami peningkatan sebesar 0,4 – 0,7. Berkebalikan dengan daerah yang lain, Samudera Hindia sebelah selatan Jawa mengalami penurunan suhu sebesar -0,1 - -0,3 °C walaupun dalam signifikan tren tidak menunjukkan perubahan.

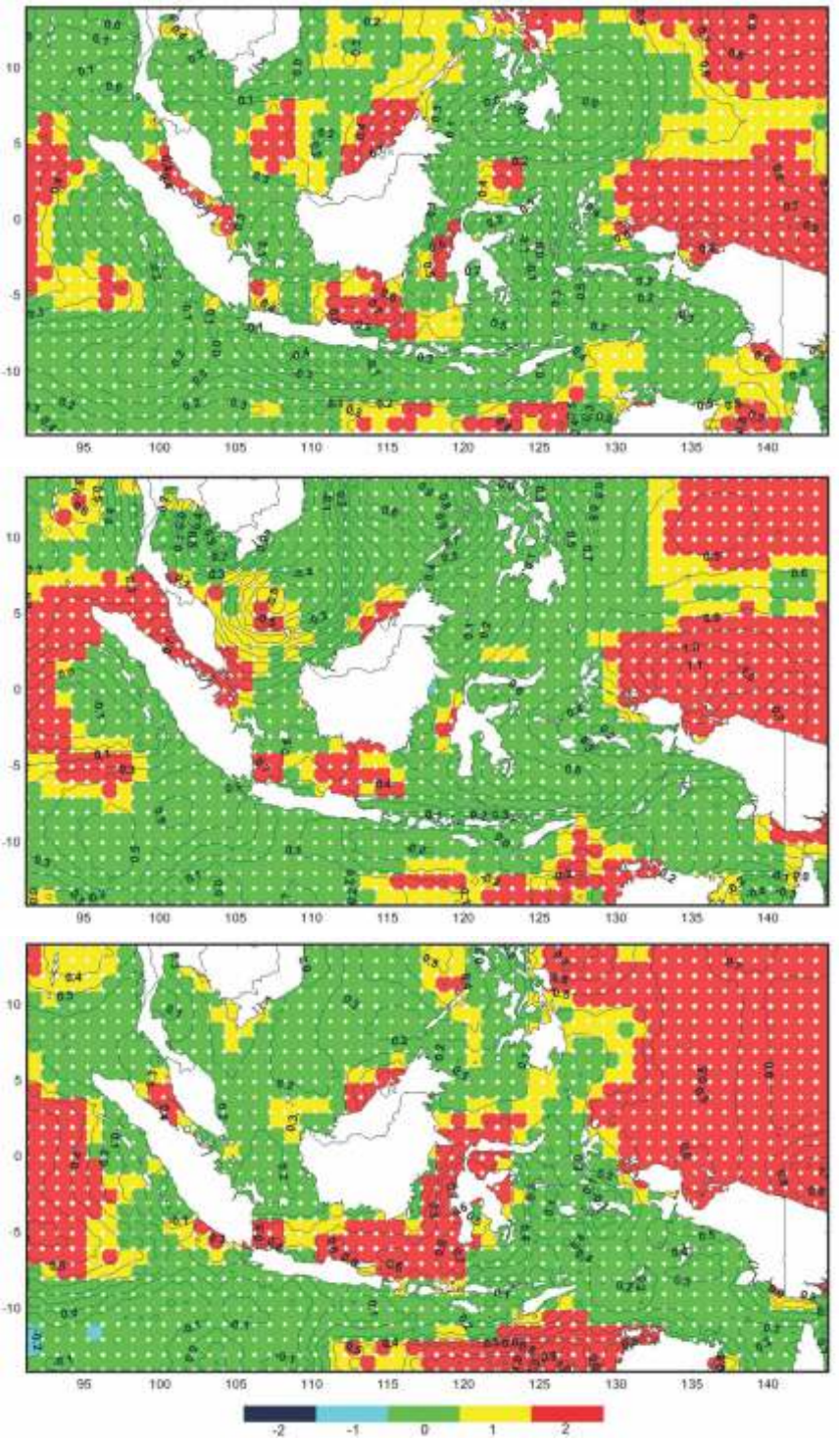
Pada bulan Agustus, sebagian besar tidak mengalami tren perubahan SPL. Wilayah yang mengalami tren peningkatan SPL umumnya terjadi di berada di sebelah utara ekuator. Daerah-daerah yang mengalami peningkatan SPL yaitu Selat Malaka, sebagian Samudera Hindia, Selat Makassar, Laut Cina Selatan, dan perairan sekitar Biak. Dibanding dengan bulan sebelumnya daerah yang mengalami tren perubahan suhu luasannya semakin sedikit. Di Laut Jawa bagian selatan umumnya tidak mengalami perubahan trend (*no trend*). Peningkatan SPL pada bulan Agustus masih terjadi di Samudera Pasifik sebelah utara Papua dengan peningkatan 0,5 – 0,9, sekeliling ujung Pulau Sumatera sampai Selat Malaka peningkatannya 0,3 – 0,6.

Pada bulan JJA, untuk wilayah Indonesia sebagian besar tidak mengalami perubahan tren, kecuali untuk di Samudera Pasifik yang berbatasan dengan Papua, Selat Makassar, Samudera Hindia di sebelah barat dan selatan ujung Sumatera, Selat Malaka, serta Laut China Selatan mengalami trend peningkatan SPL. Wilayah perairan Nusa Tenggara dan Laut Banda juga mengalami trend kenaikan SPL, tetapi hanya pada bulan Agustus (untuk kelompok musim JJA). Peningkatan SPL terjadi di Samudera Pasifik di sekitar Papua, dengan kenaikan sebesar 0,4 – 0,8 °C dan di Samudera Hindia di sekitar ujung Pulau Sumatera juga mengalami kenaikan 0,4 – 0,6 °C. Penurunan terjadi di Samudera Hindia sebelah selatan Pulau Jawa yaitu -0,1 - -0,2 °C, dan pada bulan Agustus penurunan hingga -0,4 °C.

Pada bulan September, umumnya perairan di wilayah Indonesia tidak mengalami perubahan suhu (*no trend*). Sedikit wilayah perairan yang mengalami peningkatan SPL meliputi Selat Malaka, sebagian Laut Jawa sebagian Selat Makassar, dan sebagian Samudera Pasifik bagian barat. Peningkatan SPL berdasar linear tren, terjadi di Selat Makassar sebesar 0,5 – 0,6 °C, Laut Jawa sebesar 0,5 – 0,7 °C, sebagian perairan utara Kalimantan sebesar 0,4 – 0,7 °C serta di sebagian Samudera Pasifik bagian barat sebesar 0,5 – 0,9 °C. Di sebelah selatan Pulau Jawa mengalami penurunan sebesar -0,1 - -0,4°C seperti pada Gambar 6.

Tren peningkatan SPL pada bulan Oktober hanya terjadi di beberapa wilayah perairan di Indonesia, yaitu di sebagian Samudera Pasifik sebelah utara Papua, sebelah utara Jawa Timur, Selat Malaka dan Selat Sunda. Peningkatan SPL yang dilihat melalui linier trend terjadi di Samudera Pasifik bagian barat sebesar 0,7 – 1,1 °C. Penurunan SPL terjadi di perairan sekitar kepulauan Natuna sebesar -0,3 - -0,6 °C.

Pada bulan November, wilayah perairan yang mengalami peningkatan SPL meliputi sebagian selat Malaka, Selat Sunda, sebagian Laut Jawa, Selat Makassar, sebagian Laut Sulawesi, Laut Timor, dan sebagian Samudera Pasifik barat. Dibanding dengan bulan September dan Oktober, pada bulan November ini wilayah yang mengalami tren peningkatan SPL lebih luas. Berdasarkan linier tren, wilayah yang mengalami peningkatan SPL adalah di Selat Makassar dengan peningkatan 0,5 – 0,7 °C, sebelah utara Jawa Timur sampai Lombok peningkatan 0,6 °C, Laut Timor 0,5 – 1,0°C , dan di sebagian Samudera Pasifik sebelah utara Papua dengan kenaikan 0,5 – 0,9°C.



Gambar 6. Peta tren dan signifikan tren SPL wilayah Indonesia bulan September, Oktober dan November tahun 1982-2009.

Dilihat secara musiman, karakteristik SPL di wilayah Indonesia sangat bergantung pada sirkulasi monsun. Pada periode monsun Asia, wilayah Indonesia bagian utara mengalami SPL yang lebih hangat dibanding bagian selatan, sebaliknya pada periode monsun Australia, bagian selatan yang mempunyai SPL lebih hangat. Pada musim peralihan, di mana matahari berada di atas ekuator, wilayah Indonesia relatif lebih hangat dibanding wilayah sekitarnya dan wilayah-wilayah dengan pola hujan ekuatorial mengalami puncak musim hujan. Hal ini sesuai dengan penelitian[7], yang menyatakan bahwa siklus musiman SPL di Samudera Hindia relatif tetap dari tahun ke tahun, dan sangat didominasi oleh pola monsun. Korelasi antara monsun dengan SPL di Samudera Hindia dan Pasifik sangat tinggi dengan nilai 0,8 yang menunjukkan bahwa keduanya mempunyai hubungan yang sangat kuat[14]

Dari hasil penelitian dijelaskan bahwa umumnya pada musim Desember-Januari-Februari (DJF), sebagian besar wilayah laut Indonesia mengalami tren

peningkatan SPL. Tren peningkatan tertinggi berada di perairan sekitar Laut Sulawesi, Halmahera dan Laut Pasifik bagian barat. Luasan wilayah yang memiliki tren peningkatan SPL paling luas terjadi saat bulan Desember, kemudian semakin menyempit pada bulan Januari dan Februari. Disamping adanya tren peningkatan SPL, pada musim ini juga terjadi tren penurunan SPL di Laut Cina Selatan yang terlihat pada bulan Januari dan intensitasnya menurun pada bulan Februari, tetapi penurunan intensitas ini diikuti oleh peningkatan intensitas tren penurunan SPL di perairan Teluk Carpentaria. Begitu juga peningkatan suhu permukaan laut selama 28 tahun musim hujan ini paling tinggi terjadi pada bulan Desember dimana di Samudera Pasifik bagian barat mengalami peningkatan SPL sebesar 0,8 – 1 ^{o}C.

Pada musim peralihan menuju kemarau bulan Maret-April-Mei (MAM) perairan Indonesia didominasi oleh *no trend*. Hanya sedikit daerah yang mengalami tren peningkatan maupun penurunan suhu permukaan laut, derah yang mengalami tren peningkatan SPL meliputi Selat Makassar, Biak, Teluk Siam dan Laut Andaman. Pada umumnya daerah-daerah tersebut masuk dalam tren kelompok b dan c. Pada bulan Mei terlihat adanya tren penurunan SPL di Laut Andaman dan perairan sekitar Filipina. Perubahan SPL pada musim ini berkisar antara -0,4 – 0,6 ^{o}C dimana angka negatif menunjukkan penurunan SPL sedangkan nilai positif menunjukkan peningkatan SPL.

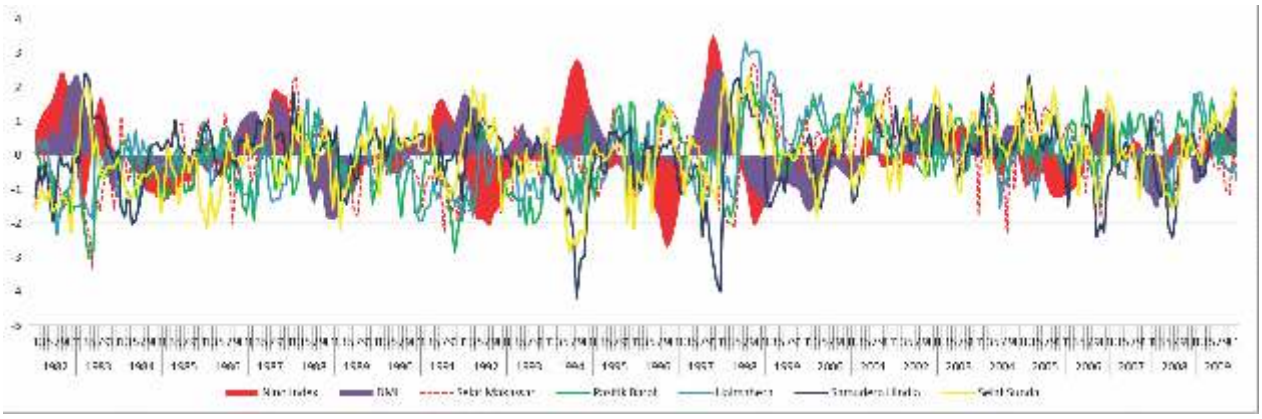
Pada musim kemarau bulan Juni-Juli-Agustus (JJA) ada perluasan area yang mengalami tren peningkatan SPL, terutama di Selat Malaka dan Samudera Pasifik bagian barat. Tren peningkatan SPL terlihat paling luas pada bulan Juli yang umumnya masuk kategori kelompok 1 dan berada di Samudera Pasifik bagian barat. Tren penurunan SPL juga masih terlihat di sekitar perairan Filipina pada bulan Mei-Juli dan Teluk Carpentaria pada bulan Juni yang berkembang sampai bulan Agustus dan menurun pada bulan September. Perubahan SPL yang terjadi di perairan Indonesia pada musim kemarau ini berkisar antara -,2 – 0,6 ^{o}C.

Pada musim peralihan menuju hujan bulan September-Oktober-November (SON), daerah yang mengalami tren peningkatan SPL yaitu sekitar Selat Malaka, Samudera Hindia Laut Jawa, Selat Makassar dan Samudera Pasifik sebelah utara Papua. Perubahan SPL selama 28 tahun pada musim peralihan ini berkisar antara 0,2 – 0,6 ^{o}C. Pada periode musim SON wilayah perairan Indonesia umumnya tidak mengalami perubahan suhu (*no trend*), kecuali di Samudera Pasifik bagian barat, sebagian Selat Makassar, sebagian Laut Jawa, Selat Malaka, dan Samudera Hindia di sekitar ujung Sumatera

Selat Malaka dan Samudera Pasifik di sebelah utara Papua mengalami tren peningkatan SPL sepanjang tahun, sedangkan daerah yang paling tinggi kenaikannya adalah perairan sekitar Biak. Puncak tren peningkatan SPL terutama terjadi pada musim hujan dan musim kemarau, sedangkan pada musim peralihan tren perubahan SPL cenderung lebih lemah. Adanya variasi tren pada masing-masing daerah dimungkinkan karena adanya beberapa faktor yang meliputi arus laut, kedalaman laut serta pola sirkulasi massa air yang berbeda pada tiap-tiap daerah. Daerah yang mengalami tren peningkatan SPL lebih banyak terdapat pada perairan antar pulau dibandingkan yang berada di laut lepas. Jika dilihat secara tahunan, perairan terbuka di Samudera Hindia dan Laut Arafura tidak mengalami perubahan tren, begitu juga di Laut Cina Selatan dan perairan sekitar Filipina.

Arus laut berperan penting dalam sebaran SPL dan perubahan tren-nya di wilayah Indonesia. Daerah yang dilalui arus dari Samudera Hindia dan Pasifik nampaknya lebih nyata mengalami tren perubahan SPL, Selat Malaka, Selat Sunda, Selat Makassar, Halmahera dan Samudera Pasifik bagian barat seperti perairan Biak yang merupakan jalur pertukaran massa air antar Samudera terlihat nyata perubahannya. Di Samudera Pasifik bagian barat yang merupakan jalur arus ekuatorial selatan (*South Equatorial Current*/ SEC) mempunyai SPL yang lebih hangat akibat terbawanya massa air hangat dari Pasifik tengah[15] dan bertiupnya angin pasat (*trade wind*) dimana angin permukaan mempunyai korelasi yang tinggi dalam menentukan SPL[16]. Perairan ini sangat sensitif terhadap perubahan variabilitas SPL di Samudera Pasifik dan dipengaruhi pergerakan *warm-pool* dan fenomena ENSO. SEC berperan penting dalam transport panas yang diakibatkan oleh *warm pool* ini yang kemudian akan merubah SPL di Pasifik Barat. Semakin seringnya kejadian ENSO pada dekade ini turut berperan dalam perubahan SPL di wilayah Indonesia. Lee, et al. [17] menyatakan bahwa telah terjadi pemanasan SPL di Pasifik tengah yang kemudian dialirkan oleh SEC menuju Pasifik bagian barat. Dari perairan ini, massa air hangat kemudian ditransfer menuju ke Samudera Hindia oleh ARLINDO [17,15] melewati Selat Makassar, ke Selat Lombok, Laut Banda, Selat Ombai serta Laut Timor[18,19]. Oleh sebab itu daerah aliran ARLINDO pada penelitian ini terlihat mengalami tren peningkatan SPL akibat suplai air hangat dari Samudera Pasifik.

Arus laut berperan dalam pembentukan *eddy* (pusaran arus). Eddy berperan penting dalam pertukaran panas yaitu membentuk *mixed layer* yang kemudian akan menentukan kondisi SPL[7]. Hal ini terlihat di daerah pusaran arus seperti Biak dan Halmahera mengalami tren peningkatan SPL dan *linear tren* yang tinggi, karena terjadi percampuran massa air hangat dari Samudera Pasifik termasuk yang diakibatkan oleh adanya *warm pool*.



Gambar 7. Hubungan antara IOD dan ENSO terhadap SPL di Selat Makassar, Pasifik Barat, Halmahera, Samudera Hindia dan Selat Sunda

Tabel 1. Korelasi antara IOD dan ENSO terhadap SPL di Selat Makassar, Pasifik Barat, Halmahera, Samudera Hindia dan Selat Sunda

Korelasi	Selat Makassar	Pasifik Barat	Halmahera	Samudera Hindia	Selat Sunda
DMI	-0.19229	-0.18569	-0.29844	-0.40392	-0.31769
ENSO	-0.22601	-0.41893	-0.41963	0.087118	0.251113

Wilayah laut Indonesia sangat dipengaruhi oleh IOD dan ENSO, termasuk SPL-nya. Dinamika IOD dan ENSO yang terjadi akhir-akhir ini, bisa menimbulkan bias apakah tren peningkatan SPL ini disebabkan akibat peningkatan SPL global atau karena dinamika fenomena tersebut yang terjadi tiga dekade terakhir. Untuk itu dilakukan perhitungan korelasi antara SPL dengan indeks keduanya untuk mengetahui hubungan keterikatannya seperti ditampilkan pada Gambar 7. Pasifik Barat, Selat Makassar dan Halmahera mewakili pintu masuk ARLINDO dan berhubungan dengan ENSO, sedangkan samudera Hindia dan Selat Sunda untuk mengidentifikasi keterkaitannya dengan fenomena IOD. Dari gambar 7 dapat dilihat bahwa pada tahun El Niño, SPL di wilayah Selat Makassar, Halmahera dan Pasifik Barat cenderung turun dibanding sebelumnya. Sedangkan pada saat La Nina SPL cenderung meningkat. Hal ini terlihat pada kejadian El Nino 1983, 1994 serta 1997/1998 yang suhunya turun, sedangkan pada La Nina 1992, 1996 dan 1998 SPL cenderung meningkat.

SPL di Samudera Hindia dan Selat Sunda terlihat berubah sesuai dengan perubahan indeks IOD. Pada tahun 1983 indeks ENSO positif dan IOD negatif, SPL di daerah ini naik sedangkan Selat Makassar, Halmahera dan Samudera Pasifik bagian barat suhunya turun. Hal ini sesuai dengan penelitian Iskandar 2010[20] yang menyebutkan bahwa SPL di wilayah Laut Banda yang merupakan jalur ARLINDO dipengaruhi oleh kejadian IOD dan ENSO.

SPL di Selat Makassar, Halmahera dan Samudera Pasifik bagian barat, menunjukkan nilai korelasi dengan ENSO yang lebih besar dibandingkan dengan IOD, sebaliknya di Samudera Hindia dan Selat Sunda yang merupakan *inlet* massa air dari Samudera Hindia ke perairan Indonesia mempunyai korelasi dengan IOD yang lebih besar dibanding ENSO seperti pada Tabel 1. Hal ini berarti bahwa di daerah *inlet* ARLINDO kondisi SPL berhubungan erat dengan kondisi ENSO, sebaliknya di Samudera Hindia dan Selat Sunda, SPL lebih dipengaruhi oleh IOD.

Penelitian sebelumnya [21] yang menggunakan data SODA selama 47 tahun (1957-2004) menunjukkan bahwa rata-rata SPL pada tahun La Niña meningkat 0,2 ^{o}C dibanding rata-rata klimatologinya terutama perairan di sekitar Indonesia bagian timur meliputi sebagian Laut Sulawesi yang menjalar sampai Filipina, Selat Makassar, Laut Banda, Laut Arafuru, Laut Timor, Selat Lombok, Samudera Hindia di selatan Pulau Jawa. Demikian sebaliknya pada tahun El Niño perairan Indonesia di bagian Timur mengalami pendinginan sebesar 0,3 ^{o}C dibandingkan dengan klimatologinya. Perairan yang mengalami pendinginan tersebut meliputi Selat Makassar, Laut Sulawesi yang menjalar sampai perairan Filipina, Samudera Pasifik bagian barat sebelah utara Papua, Laut Banda, Laut Arafuru, dan perairan sekitar Pulau Timor [21]. Sedangkan *linear trend* data SPL tahun 1982-2009 pada penelitian ini berkisar antara 0,5-0,8 ^{o}C, hal ini menunjukkan bahwa tren peningkatan SPL di perairan Indonesia bukan semata-mata diakibatkan oleh fenomena IOD dan ENSO, tetapi juga akibat pemanasan SPL secara global. Penelitian-penelitaian terkini menunjukkan bahwa secara global SPL mengalami kenaikan 0,11 ^{o}C (0,09-0,13 ^{o}C) perdekade [22].

4. Kesimpulan

Variasi SPL di wilayah Indonesia bergantung pada siklus monsun yang melewati Indonesia dimana pada periode monsun Asia SPL di wilayah utara lebih hangat sebaliknya pada periode monsun Australia, di

selatan yang lebih hangat dan di sekitar ekuator mengalami SPL paling hangat pada periode peralihan. Secara umum diwilayah Indonesia terutama di *inner sea* terjadi tren peningkatan SPL dengan probabilitas > 95%. Daerah aliran ARLINDO dan SEC Samudera Pasifik yang meliputi perairan sekitar Biak, Selat Makassar, Halmahera, dan Laut Banda, pada umumnya mengalami tren peningkatan SPL yang paling tinggi dibandingkan wilayah sekitarnya. Dari *linear tren* terlihat di daerah tersebut mengalami kenaikan SPL yang paling tinggi dibandingkan daerah lain yaitu antara 0,5-1,1 ^{o}C pada periode DJF. Dinamika SPL di *inlet* ARLINDO seperti Selat Makassar, Halmahera dan perairan sekitar Biak berkorelasi tinggi terhadap fenomena ENSO, sedangkan perairan sebelah barat seperti Samudera Hindia dan Selat Sunda lebih berkorelasi dengan IOD.

Daftar Pustaka

[1] Aldrian, E. (2008). *Meteorologi Laut Indonesia.* Jakarta: Puslitbang BMKG.

[2] Carton, J. A., Cao, X., Giese, B. S., & da Silva, A. M. (1996). Decadal and Interannual SST Variability in The Tropical Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography , 26*, 1165-1175.

[3] Foltz, G. R., & McPhaden, M. J. (2008). Impact of Saharan Dust on Troical North Atlantic SST. *Journal of Climate , 21*, 5048-5060.

[4] Ting, M. F., Kushnir, Y., Seager, R., & Li, C. (2009). Forced and Internal Twentieth-Century SST Trends in the North Atlantic. *Journal of Climate. 22,* 1469-1481

[5] Stewart, H. R. (2008). *Introduction to Physical Oceanography*. Texas: A&T University

[6] Lau, N. C. (1997). Interaction between Global SST Anomalies and Midlatitude Atmospheric Circulation. *Bulletin of the American Meteorological Society , 78*, 21-33.

[7] Jochim, M., & Murtugudde, R. (2005). Internal Variability of Indian Ocean SST. *Journal of Climate , 18*, 3726-3738.

[8] Su, J., Wang, H., Yang, H., Drange, H., Gao, Y. & Betsen, M. (2008). Role of the Atmospheric and Oceanic Circulation in the Tropical Pacific SST Changes. *Journal of Climate. 21,* 2019-2034

[9] Chung, C. E., & Ramanathan, V. (2006). Weakening of North Indian SST Gradients and the Monsoon Rainfall in India and the Sahel. *Journal of Climate , 19*, 2036-2045.

[10]Aldrian, E. (2010). Climate Change and Monsoon Interplay in the Maritime Continent. *International Symposium on Equatorial Monsoon System* (pp. 95-105). Jakarta: Puslitbang BMKG.

[11](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/*), 17 Agustus 2010*

[12]Mondal, A., Kundu, S., & Mukhopadhyay, A. (2012). Rainfall Trend Analysis by Mann_Kendall Test: A Case Study of North_eastern of Cuttack District, Orissa. *International Journal of Geology , 2*(1), 70-78.

[13]Ihara, C., Kushnir, Y., & Cane, M. A. (2008). Warming Trend of the Indian Ocean SST and Indian Dipole from 1880 to 2004. *Journal of Climate , 21*, 2035-2046.

[14]Krishnamurthy, V., & Kirtman, B. P. (2009). Relation between Indian Monsoon Variability and SST. *Journal of Climate , 22*, 4437-4458.

[15]Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian seas and their throughflow. *J. of the Oceanography Society. 18*, 14-27.

[16]Naguro, M., & Konda, M. (2005). Relationship between the Interannual Variation of the North Indian Ocean SST Induced by Surface Wind and ENSO during Boreal Summer. *Journal of Climate , 18*, 1942-1956.

[17]Lee, T., Fukumori, I., Menemenlis, D., Xing, Z., & Fu, L-L. (2002). *Journal of Physical Oceanography. 32,* 1404-1429

[18]Hasan, M. (1998). Arus lintas Indonesia (Arlindo). *Oseana, 23*, 1-9

[19]Pandey, V. K., & Pandey, A. C. (2006). Heat transport through Indonesian throughflow. *J. Ind. Geophysic Union. 10,* 273-277.

[20] Iskandar, I. (2010). Seasonal and Interannual Pattern of Sea Surface Temperature in Banda Sea as Revealed by Self-Organising Map. *Continental Self Research*, 30, 1136 – 1148

[21] Suratno, dkk. (2010). Kajian Dampak dan Variabilitas Iklim Laut di Indonesia. Laporan Tahunan Puslitbang BMKG, 2010, 1 – 14

[22] IPCC, 2013 : Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basic. *Contribution of Working Group I to the Fith Assessmentt Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.