

MEKANISME INTERAKSI LAUT-ATMOSFER TERKAIT TERBENTUKNYA DAERAH PERSISTEN TEKATAN RENDAH DI SAMUDERA HINDIA TIMUR BARAT DAYA SUMATERA SELAMA PELAYARAN INDONESIA PRIMA 2017

*AIR-SEA INTERACTION MECHANISMS IN THE GENERATION OF PERSISTENCE LOW
PRESSURE AREA OVER THE EASTERN INDIAN OCEAN SOUTHWEST SUMATERA
DURING THE INDONESIA PRIMA 2017 FIELD CAMPAIGN*

**Siswanto¹, Edi Kusmanto², Sri Puji Rahayu¹, Nelly Florida Riama¹,
Michael J. McPhaden³**

¹Pusat Meteorologi Maritim – BMKG, Jl. Angkasa 1 No.2 Kemayoran Jakarta, 10610

²Pusat Penelitian Oseanografi – LIPI, Jl. Pasir Putih I Ancol Timur, Jakarta 144303

³Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) – National Oceanic and Atmosphere Administration
(NOAA), USA

*E-mail korrespondensi: siswanto@bmkg.go.id

Naskah masuk: 09 Januari 2018; Naskah diperbaiki: 18 Maret 2019; Naskah diterima: 22 Maret 2019

ABSTRAK

Pengamatan laut bawah permukaan sampai kedalaman 1000m telah dilakukan selama Expedisi Indonesia PRIMA 2017 dengan meluncurkan instrumen Conductivity Temperature Depth (CTD). Terdapat tujuh stasiun CTD yang terletak di jalur Arus Katulistiwa Selatan (South Equatorial Current, SEC). Pengamatan atmosfer telah dilakukan dengan pelepasan balon radiosonde hingga ketinggian 17 km dan pengamatan meteorologis in situ tiap jam di atas kapal. Makalah ini membahas analisis data kelautan bawah permukaan (suhu dan salinitas) serta konvektifitas atmosfer yang diperoleh pada saat etape I ekspedisi menuju 12°LS 85°BT untuk menyelidiki kemungkinan terusan massa air Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) di Samudra Hindia dan kaitannya dengan dinamika pusat tekanan rendah atmosfer di Samudra Hindia barat daya Sumatera. Analisis menunjukkan bahwa terdapat interaksi timbal balik laut-atmosfer pada saat berkembangnya daerah tekanan rendah di Samudra Hindia barat daya Sumatera yaitu keberadaan kolam air yang lebih panas (>28°C) dari sekitarnya yang berasosiasi dengan pusat tekanan rendah atmosfer di atasnya. Kolam air hangat berasal dari massa air intrusif yang diduga berkaitan dengan penetrasi massa air ARLINDO di Samudra Hindia.

Kata kunci: Expedisi, Indonesia PRIMA, CTD, Samudra Hindia, daerah tekanan rendah, ARLINDO

ABSTRACT

Sea sub-surface observations down to 1000m depth have been done during Expedition Indonesia PRIMA 2017 Indonesia by launching Conductivity Temperature Depth (CTD) instrument. There are seven CTD stations located on the South's Equatorial Current (SEC) pathway. Observations of the atmosphere have been done by releasing radiosonde balloons up to a height of 17 km and the hourly synoptic meteorological observation on board. This paper discusses the analysis of sub-surface marine data (temperature and salinity) as well as atmospheric convectivity obtained at the shiptime of Stage I of the Expedition towards 12°S 85°E to investigate the possibility of Indonesia Throughflow (ITF) water masses penetration in the Indian Ocean and its relation to the dynamics of the atmospheric low-pressure center in the Indian Ocean southwest of Sumatera. The analysis shows that there is an air-sea interaction at the time of the development of the low-pressure-area in the region, i.e. the presence of a warm pool region (> 28 °C) associated with a low-pressure atmospheric center. It is likely that the warm pool came from intrusive water masses suspected to be associated with ITF's water mass penetration in the Indian Ocean.

Keywords: Expedition, Indonesia PRIMA, CTD, Indian Ocean, low pressure area, ITF

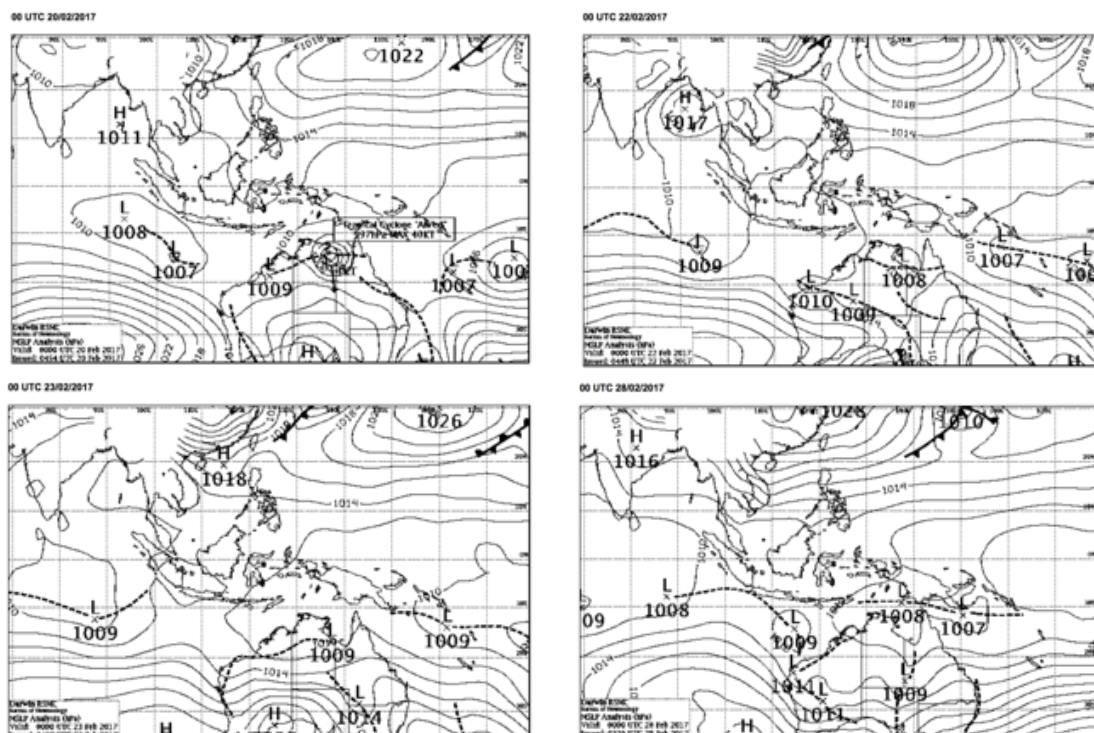
1. Pendahuluan

Sistim tekanan rendah atmosfer di suatu tempat dapat mempengaruhi keadaan cuaca di sekitarnya. Sistim perawanan, curah hujan dan angin berkaitan erat dengan variasi tekanan harian atmosfer. Misalnya, curah hujan yang tinggi yang menyebabkan banjir di wilayah Jakarta dan sekitarnya juga di daerah Lampung, beberapa di antaranya dapat dikaitkan dengan kehadiran daerah tekanan rendah di Samudera Hindia barat daya Sumatera. Tidak jarang sistim tekanan rendah di wilayah ini berkembang menjadi sistim badai atau siklon tropis yang bergerak menuju barat – barat daya ke arah Pulau La Reunion di Afrika atau ke Wilayah Indonesia seperti Siklon Tropis Dahlia pada akhir November 2017 lalu.

Suhu permukaan laut (*sea surface temperature*, SST) diketahui memiliki kaitan langsung dengan tekanan atmosfer permukaan di atasnya. Apabila suhu permukaan laut lebih panas maka tekanan udara di sekitar permukaan akan turun. Dengan kata lain, SST berbanding terbalik dengan tekanan udara. Penurunan gradien tekanan akan diikuti dengan melemahnya embusan angin. Wilayah yang mengalami SST lebih panas akan cenderung menjadikan tekanan di sekitar daerah tersebut

menjadi lebih rendah, konveksi meningkat karena suhu permukaan laut tinggi sehingga membangkitkan proses penguapan yang besar dan menghasilkan cukup banyak uap air.

Variasi SST menjadi suplai dan pengontrol kelembaban udara di atasnya melalui proses konveksi dan penguapan, selanjutnya dapat memengaruhi variabilitas curah hujan. Penelitian Hendon [1] menyatakan variabilitas SST memengaruhi 50% variasi curah hujan seluruh Indonesia dan 10-15% di Perairan India. Menurut Boer et.al.[2], anomali SST di lokasi 110° - 120° BT, 5° LU - 5° LS memiliki hubungan yang lebih kuat terhadap anomali curah hujan bulanan dibandingkan dengan anomali suhu permukaan laut di zona lain. Aldrian dan Susanto [3] menghubungkan kedua parameter tersebut secara lebih rinci yaitu dengan mengkorelasikan curah hujan Indonesia pada 3 wilayah (region) hujan (monsunal, ekuatorial dan lokal) dengan SST lokal dan SST wilayah. Indikasi keterkaitan hubungan antara kedua parameter tersebut dapat memberikan peluang untuk pemanfaatan data SST menjadi informasi yang lebih aplikatif, misalnya prakiraan curah hujan pada lokasi yang spesifik dari informasi SST pada wilayah tertentu [4].



Gambar 1. Perkembangan dinamika tekanan udara permukaan laut di wilayah Samudera Hindia hingga Pasifik pada jam 00 UTC (07.00 WIB) tanggal 20, 22, 23 dan 28 Februari 2017. Kemunculan daerah tekanan rendah atmosfer di perairan Samudera Hindia timur barat daya Sumatera (simbol L pada gambar) cukup persisten selama 20 – 28 Februari 2017 tersebut. (Sumber data: Darwin RSMC/BoM Australia).

Kehadiran pusat tekanan rendah di Samudera Hindia bagian timur barat daya Lampung berimplikasi membentuk daerah pertemuan (konvergensi),

perlambatan dan belokan angin (shear) di sekitar wilayah Sumatera bagian selatan dan Jawa bagian barat yang mengakibatkan kondisi atmosfer menjadi

tidak stabil sehingga meningkatkan potensi hujan lebat disertai kilat atau petir dan angin kencang. Sebagai contoh, dinamika tekanan udara permukaan laut di wilayah Samudera Hindia bagian timur barat daya Lampung menunjukkan kemunculan daerah tekanan rendah atmosfer (low pressure area, L) yang cukup persisten dalam kurun waktu tanggal 20 - 28 Februari 2017 (Gambar 1). Kondisi itu bertepatan dengan rute Pelayaran Ilmiah Ekspedisi InaPRIMA2017 oleh BMKG/LIPI/NOAA yang merupakan pelaksanaan Kegiatan Survey Data Oseanografi BMKG tahun 2017. Tim peneliti melaporkan pada kurun waktu tersebut, terutama tanggal 24 dan 25, hujan deras terjadi di sekitar wilayah 8°S – 12°S, 93° – 95°E disertai laut yang bergelombang cukup tinggi dan angin kencang.

Kajian yang menyangkut hubungan interaksi laut dan atmosfer yang menggambarkan mekanisme sistem tekanan rendah dan curah hujan pada wilayah Samudera Hindia timur barat daya Sumatera dengan SST dan pengaruh pergerakan massa air (arus SEC, *Equatorial Counter Current* (ECC) dan *South Java Current* (SJC)) masih sangat jarang. Kajian ini diharapkan bermanfaat dalam memberikan deskripsi kejadian, dapat juga dikembangkan menjadi informasi dan masukan bagi metode prakiraan serta pemodelan cuaca regional.

2. Data dan Metode

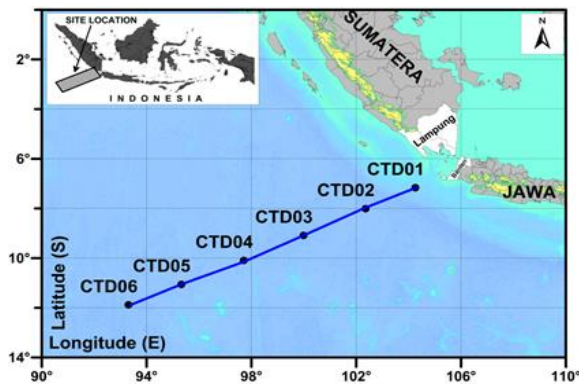
Data yang digunakan dalam kajian ini adalah data atmosfer dan oseanografi dari pengamatan atmosfer permukaan dan 6 stasiun pertama *Conductivity Temperature Depth* (CTD) di wilayah perairan Samudera Hindia timur barat daya Sumatera selama digelar Ekspedisi InaPRIMA2017 tanggal 20 Februari – 16 Maret 2017 menggunakan Kapal Riset Baruna Jaya VIII (Gambar 2). Data tersebut adalah:

- Data posisi kapal, arah dan kecepatan kapal, suhu dan tekanan udara permukaan, arah dan kecepatan angin serta tinggi gelombang selama 24 jam setiap hari pada jalur pelayaran. Pengamatan atmosfer permukaan dilakukan setiap 1 jam sekali.
- Data suhu, salinitas dan *sigma-t* (densitas – 1000) diukur secara kontinyu dari permukaan hingga kedalaman 1000 m dengan CTD tipe SBE 911+ Seabird Electronic Inc. pada setiap stasiun (CTD01-06).
- Data arus perkedalaman direkam secara kontinyu menggunakan *Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler* (SADCP) berfrekuensi 75 kHz buatan RD Instrument. Peralatan ini memiliki zona kosong pasca transmisi (*blankaftertransmitzone*) 8 m ditambah dengan lunas kapal 4.3 m sehingga kedalaman teratas pengukuran adalah 12.3 m hingga pada kedalaman 500 m dari permukaan dengan interval kedalaman setiap 5 m. Pengukuran profil

arus dilakukan di sepanjang lintasan dari stasiun CTD 01 hingga CTD 06. Data terukur selanjutnya diekstrak menggunakan perangkat lunak WINADCP untuk mendapatkan kecepatan dan arah arus dalam format ASCII. Proses kontrol kualitas data dilakukan dengan menghilangkan data pencilan (*outlier*), *percent good* dibawah 50% dan kecepatan arus yang lebih dari 250 cm/sec.

Selain data pengamatan insitu atmosfer – oseanografi di atas, juga digunakan data penunjang lainnya yaitu citra satelit penginderaan jauh untuk SST rerata mingguan diperoleh dari MODIS/Terra Aqua 22 – 28 Februari 2017. Sensor satelit penginderaan jauh mendeteksi radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh permukaan laut sehingga dengan algoritma tertentu sebaran SST dapat diperoleh. Radiasi yang dipancarkan umumnya berupa radiasi infra merah jauh (biasa disebut juga sebagai infra merah thermal) dengan panjang gelombang antara 8 – 15 μm . Radiasi infra merah thermal ini dapat melewati atmosfer tanpa diserap oleh gas dan molekul air yang berada di atmosfer, karena pada panjang gelombang antara 8 – 14 μm tersebut serapan yang terjadi di atmosfer cukup rendah. Sehingga, panjang gelombang infra merah thermal banyak digunakan untuk mendeteksi emisi permukaan sesuai dengan suhunya. Data citra MODIS level 3 yang digunakan adalah data citra di wilayah Samudera Hindia dan sebagian wilayah Indonesia. Pengolahan data citra MODIS untuk ekstraksi SST menggunakan perangkat lunak SEADAS (*SeaWiFS Data Analysis System*) versi 6.2.

Data analisis tekanan udara permukaan laut didapatkan dari Darwin RSMC/BoM Australia digunakan untuk menggambarkan dinamika atmosfer regional sehingga kemunculan daerah tekanan rendah atmosfer di perairan Samudera Hindia timur barat daya Sumatera dapat dideteksi. Data estimasi akumulasi curah hujan selama kurun waktu 22–28 Februari 2017 diolah dari produk harian (0–24 h) satelit Global Precipitation Measurement (*GPM/IMERG* multi-satellite precipitation) digunakan untuk menggambarkan sebaran hujan terkait dengan kondisi atmosfer yang bertepatan dengan kemunculan daerah tekanan rendah atmosfer tersebut. Tingkat konvektivitas atmosfer dan labilitas kolom udara dianalisis menggunakan diagram *skew-T* hasil pelepasan balon udara radiosonde hingga ketinggian sekitar 16 hingga 22 km dengan perangkat lunak *The Universal RAOBsonde Observation program* (RAOB). Pada tanggal 25 Februari 2017 dilakukan dua kali pelepasan balon radiosonde pada pukul 02 UTC (pagi hari) dan 09 UTC (sore hari).



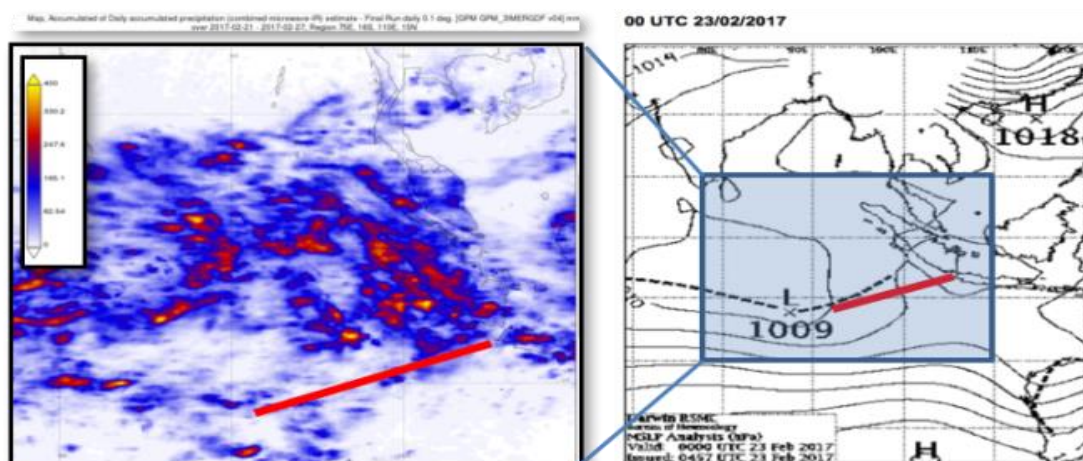
Gambar 2. Lokasi pengambilan data CTD di wilayah perairan Samudera Hindia timur barat daya Sumatera selama 22–28 Februari 2017.

3. Hasil dan Pembahasan

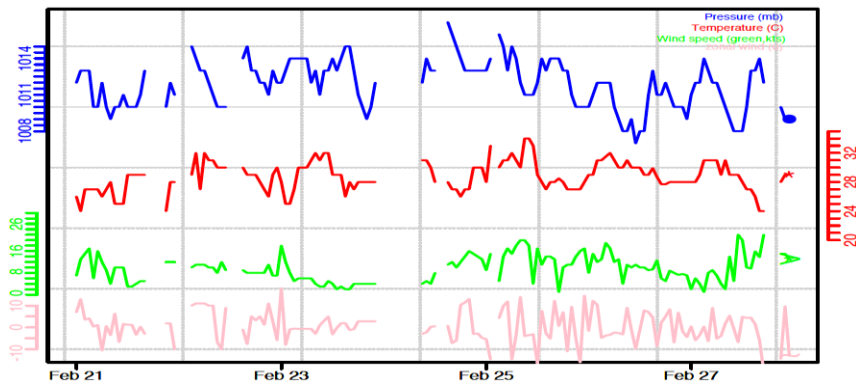
Pusat tekanan rendah dan dinamika cuaca. Sebagaimana telah disebutkan, dinamika tekanan udara permukaan laut di wilayah Samudera Hindia bagian timur barat daya Lampung mengindikasikan kemunculan daerah tekanan rendah atmosfer (simbol L dalam Gambar 3b) yang cukup persisten dalam kurun waktu 20–28 Februari 2017 [5]. Kondisi tersebut bertahan pada saat pengambilan data oseanografi stasiun CTD 01–11 (Gambar 2). Pada kurun waktu tersebut, terutama tanggal 24 dan 25, hujan deras terjadi di sekitar wilayah 8S – 12S, 93 – 95E disertai laut yang bergelombang cukup tinggi dan angin kencang. Estimasi akumulasi curah hujan selama kurun waktu 22–28 Februari 2017 diolah dari produk harian (0–24 h) satelit GPM menunjukkan pada area tersebut dapat mencapai >400 mm. Curah hujan tanggal 24 dan 25 dapat mencapai >100 mm. Dari peta sinoptik tekanan udara permukaan laut

tanggal 23 Februari 2017 (Gambar 3b) diketahui bahwa pada posisi CTD 06 (12°S 90°E) terdapat pusat tekanan rendah dengan tekanan udara sekitar 1009 milibar. Pusat tekanan rendah 1009 milibar tersebut terkonfirmasi oleh pengukuran barometer kapal pada tanggal 23 Februari pukul 20 UTC (dini hari waktu lokal atau 03.00 WIB), sementara 6 jam sebelum dan 2 jam sesudahnya tekanan udara permukaan laut berturut-turut 1015, 1015, 1013, 1011, 1010, 1009, 1010, 1012 milibar (Gambar 4).

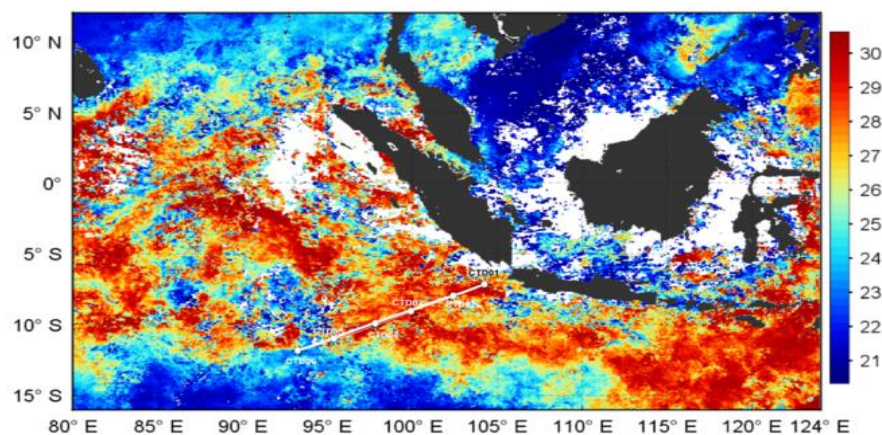
Perubahan gradien tekanan 6 milibar dalam 6 jam atau setidaknya 3 milibar dalam 3 jam terakhir di sekitar pusat tekanan rendah akan dapat memungkinkan terpicunya adveksi udara basah hasil penguapan permukaan laut pada siang harinya menuju pusat tekanan rendah tersebut sehingga menumbuhkan awan-awan menjulang tinggi melalui proses konvergensi pada pola pusaran (siklonik) atmosfer. Pada kondisi atmosfer demikian, data suhu permukaan pada Gambar 4 tidak dapat menyatakan hubungan langsung dengan tekanan permukaan akibat variable angin yang berubah secara cepat, namun dugaan di sekitar lokasi stasiun CTD 04 sebagai daerah pusat pusaran tekanan rendah dapat ditunjukkan oleh kecepatan angin yang cenderung calm (~3 knot). Namun begitu, dalam sistem atmosfer terbuka, terdapat dinamika dimana posisi pusat tekanan rendah tidak selalu tepat berada di atas SST yang hangat. Dinamika ini dikenal sebagai mekanisme kesesuaian respon tekanan (*the pressure adjustment mechanism*), dimana angin permukaan dan kecepatan udara vertikal memainkan peran dan mengurangi respons pada skala yang lebih kecil [7][14].



Gambar 3. (kiri) Estimasi akumulasi curah hujan selama kurun waktu 22–28 February 2017 diolah dari produk harian (0–24 h) satelit GPM (GPM/IMERG multi-satellite precipitation). (kanan) Peta sinoptik tekanan permukaan laut tanggal 23 Februari 2017 dengan posisi tekanan terendah 1009 hPa (L) di dekat stasiun CTD 06. Garis merah menggambarkan lintasan jalur kapal dan stasiun pengukuran CTD 01 – CTD 06 sesuai Gambar 2.



Gambar 4. Deret waktu perubahan variabel atmosfer permukaan: tekanan udara permukaan(garis biru), suhu udara (garis merah), kecepatan angin (hijau) dan komponen angin zonal (timur-barat, pink) selama kurun waktu 21–27 February 2017 diolah dari pengamatan atmosfer permukaan tiap jam menggunakan stasiun cuaca otomatis milik Kapal Riset Serbaguna Baruna Jaya VIII.



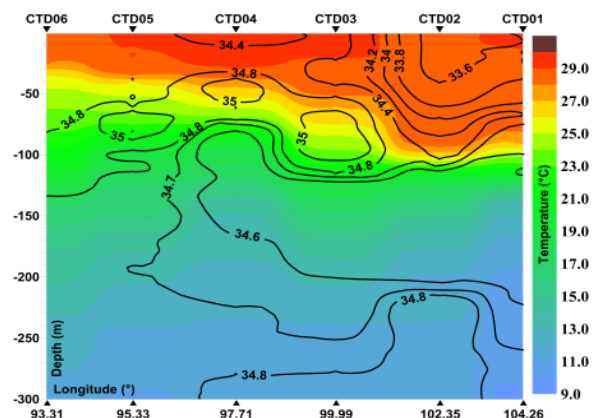
Gambar 5. Citra satelit MODIS/Terra-Aqua untuk SST rerata mingguan 22–28 Februari 2017. Garis putih menggambarkan lintasan jalur kapal dan stasiun pengukuran CTD 01–06 sesuai Gambar 2.

Kolam hangat di Lapisan Permukaan

Gambar 5 menunjukkan citra satelit penginderaan jauh SST rerata mingguan yang diperoleh dari MODIS/Terra-Aqua 22–28 Februari 2017. Lintasan CTD 01–06 juga ditambahkan. Secara umum wilayah perairan Samudera Hindia bagian timur barat Sumatera mengindikasikan terdapat wilayah-wilayah dengan permukaan laut yang lebih hangat dari sekitarnya. Lintasan CTD 01–06 juga menunjukkan posisi CTD 03–04 merupakan daerah dengan permukaan laut yang lebih hangat 28–30°C. Irisan vertikal bujur-kedalaman dari suhu laut, salinitas dan densitas pada lintasan dari Selat Sunda–barat daya Sumatera sepanjang ~1100 km digambarkan pada Gambar 6. Suhu relatif tinggi 28°– 29°C tampak dominan di lapisan permukaan, sesuai dengan analisis SST MODIS pada Gambar 5.

Suhu relatif lebih tinggi dijumpai pada stasiun CTD 1, 3, 4 dan 5, sedangkan pada CTD 2 dan CTD 6 menunjukkan suhu yang relatif lebih rendah. Suhu permukaan pada masing-masing stasiun dan perbandingannya dengan SST MODIS ditunjukkan oleh Tabel S1 dan Gambar S1 dalam Appendik. Suhu tertinggi di jumpai pada CTD 4 dengan kisaran 29.4°C sedang suhu terendah di jumpai di stasiun

CTD 6 dengan suhu 28.3°C. Perbedaan antara suhu tertinggi dan terendah mencapai 1.14°C. Lapisan termoklin (didefinisikan sebagai lapisan dengan isotherm 25°C) tampak dengan kemiringan ke kiri, sekitar kedalaman 90 meter di sisi timur dekat Selat Sunda dan sekitar kedalaman 40 meter di Samudera Hindia pada posisi stasiun CTD 06.



Gambar 6. Penampang irisan suhu (warna) dan salinitas (kontur) hingga kedalaman 300 meter dari lintasan (transek) CTD 01 – 06.

Ditemukan semacam kolam laut hangat hingga kedalaman 30 meter di sekitar area stasiun CTD 03 hingga stasiun CTD 05 dengan suhu > 28°C disertai oleh penampakan kolam salinitas berkisar 34.4 PSU di mana lebih rendah dari salinitas sekitarnya. Kami menduga kolam hangat ini merupakan irisan dari jalur yang lebih panjang dan luas yang berasal dari timur dan berkaitan dengan aliran Arus Lintas Indonesia (ARLINDO atau Indonesian Troughflow, ITF) terusan dari Selat Lombok dan Laut Timor. ARLINDO / ITF merupakan arus bawa permukaan laut yang membawa masa air dengan salinitas 34.6 – 34.8 PSU yang mengalir dari Samudera Pasifik Barat menuju Samudera Hindia melalui Selat Makassar dan Laut Kepulauan Maluku akibat adanya gradien kerapatan masa air dan beda elevasi muka laut antar dua Samudera tersebut. ARLINDO di Samudera Hindia bagian timur selama ini diduga bergabung dengan arus besar samudera yang sudah dikenal di wilayah ini yaitu Arus Selatan Katulistiwa (South Equatorial Current, SEC). Lebih lanjut mengenai terobosan masa air laut bawah permukaan dari ARLINDO di wilayah Samudera Hindia bagian timur barat daya Lampung akan dibahas pada artikel kami lainnya.

Pertukaran panas paras laut-atmosfer dan konvektivitas atmosfer. Suhu permukaan laut berperan penting dalam mengatur perubahan panas, momentum, partikel garam dan pertukaran gas (*gas fluxes*) antara laut dan atmosfer. Disebabkan emisivitas permukaan laut sangatlah tinggi, laut sering diasumsikan hampir sebagai benda hitam (*'blackbody'*) dalam sebuah pendekatan fisis. Emisi panas gelombang panjang secara langsung proporsional dengan SST permukaan laut bagian atas (*skin SST*), yang berinteraksi secara langsung

dengan atmosfer di atasnya. Perbedaan suhu atmosfer-laut (*SST-SAT difference*) dapat digunakan untuk mengukur pertukaran panas atmosfer dekat permukaan laut. Pertukaran panas dan kandungan uap air sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kuat-lemahnya stabilitas atmosfer tersebut [9]. Beda suhu laut-atmosfer yang positif dapat mengindikasikan pertukaran fluks panas masuk dari lapis permukaan laut ke atmosfer, sementara nilai negatif menandakan sebaliknya pertukaran fluks panas masuk dari atmosfer ke lapis permukaan laut [11]. Tabel 1 menunjukkan variasi panas pada paras laut – atmosfer di setiap Stasiun pengukuran CTD dengan perhitungan beda suhu laut atmosfer. Suhu permukaan laut (SST) di dekati dengan mengambil sample pengukuran air laut pada kedalaman 80 cm, diasumsikan sebagai bulk SST dimana kerapatan (densitas) air laut bersifat masif dan cukup representatif sebagai SST.

Dari tabel 1 tampak bahwa pada periode 21 - 25 Februari 2017, hampir di setiap stasiun pengukuran CTD menunjukkan nilai beda suhu laut-atmosfer yang positif, kecuali Stasiun CTD-05. Hal ini mengindikasikan besarnya fluks panas yang mengalir dari permukaan laut ke atmosfer dalam bentuk radiasi gelombang panjang pada hari-hari dimana pengambilan data CTD berlangsung. CTD-03, CTD-04 dan CTD-05 menunjukkan temperatur air laut paling hangat sekaligus beda suhu yang kecil dengan atmosfer. Kami menduga suhu permukaan laut yang tinggi ikut memanaskan udara di atasnya (sebagaimana juga dibuktikan oleh data pengamatan suhu permukaan CTD 03–05) sehingga pertukaran panasnya cenderung cepat. Keadaan demikian dapat menjadi asupan konvektivitas molekul molekul uap air dekat permukaan yang kuat.

Tabel 1. Tabel variasi panas pada paras laut – atmosfer di setiap Stasiun pengukuran CTD.

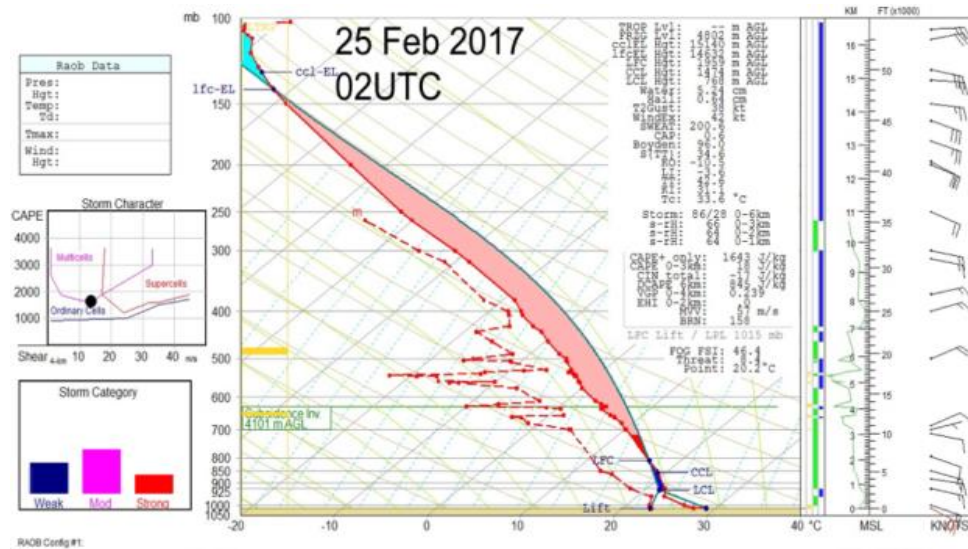
Stasiun	CTD 01	CTD 02	CTD 03	CTD 04	CTD 05	CTD 06
Tanggal Pengukuran	2017/02/21 ~05 UTC	2017/02/21 ~21 UTC	2017/02/22 ~18 UTC	2017/02/23 ~14 UTC	2017/02/24 ~10 UTC	2017/02/25 ~16 UTC
Temperatur Udara (12 m)	27.0	24.0	29.0	29.0	31.0	28.0
Temperatur Air Laut (80 cm)	29.1	28.8	29.1	29.4	29.3	28.3
Densitas Air Laut (σ_t 80 cm)	20.68	21.04	21.61	21.41	21.55	21.66
Beda suhu laut-atmosfer (°C)	2.1	4.8	0.1	0.4	-1.8	0.3
Kecepatan angin di kapal (knot)	16	12	8	3	5	13

Konvektifitas atmosfer bagian atas pada lokasi CTD-03, CTD-04 dan CTD-05 tidak dapat ditunjukkan karena ketiadaan pengukuran atmosfer pada lokasi tersebut, tetapi data udara atas dapat terwakili oleh data radiosonde di Stasiun CTD-06. Labilitas kolom udara dan tingkat konvektivitas atmosfer di Stasiun CTD-06 pada tanggal 25 Februari 2017 disajikan dalam Gambar 7. Dapat

dijelaskan bahwa pada pagi hari saat pengamatan radiosonde pertama atmosfer tergolong sangat labil. Indeks labilitas kolom udara menunjukkan terdapat potensi energi pemicu konveksi (CAPE) yang cukup besar yaitu ~1643 J/kg dengan konveksi lateral 0–3 km sebesar 18 J/kg. Tinggi lapisan pengangkatan konvektif (*lifting convective level*, LCL) teramati pada 768 meter dan parsel udara mengalami awal

kondensasi pada ketinggian 1474 meter (*convective condensation level*, CCL). Berdasarkan kriteria CAPE antara 1000–2000 J/kg dan beda kecepatan angin antar lapisan atmosfer (*wind shear*) pada ketinggian 4 km pertama yang mencapai 15 m/s, kondisi atmosfer pada tanggal 25 Februari pagi

tersebut mengindikasikan pembentukan cuaca badai kategori tingkat menengah (*moderate storm category*) dengan peluang besar bagi berkembangnya awan badai (cumulonimbus) multi-sel.



Gambar 7. Analisis konvektivitas atmosfer dan labilitas udara dari pelepasan balon udara radiosonde pada tanggal 25 Februari 2017 Jam 02 UTC (~Jam 09.00 WIB) dan 09 UTC (~Jam 16.00 WIB). Poligon dengan arsiran warna merah muda pada grafik T – Td menunjukkan luasan integrasi potensi energi pemicu konveksi (*convective availability potential energy*, CAPE) pada kolom parsel udara. Kolom paling kanan menunjukkan arah dan kecepatan angin per lapisan ketinggian atmosfer.

Mekanisme kemunculan daerah tekanan permukaan rendah di perairan Samudera Hindia barat daya Lampung. Ada beberapa arus yang berpengaruh besar terhadap pergerakan massa air di perairan Samudera Hindia barat daya Sumatera yaitu Arus Selatan Khatulistiwa (South Equatorial Current, SEC), Arus Balik Khatulistiwa (Equatorial Counter Current, ECC) dan Arus Pantai Jawa (South Java Currents, SJC) sebagaimana konseptual Gambar 8C yang diadopsi dari literatur [6], [12]. Arus SEC bergerak tetap mengarah ke barat membawa massa air dengan salinitas rendah dan suhu rendah yang berasal dari sebagian perairan Indonesia termasuk juga massa air ARLINDO. Data arus yang diperoleh selama penelitian dapat menunjukkan bahwa arus yang mengalir dari tenggara menuju ke barat laut di sekitar stasiun CTD 02 adalah Arus Selatan Khatulistiwa (SEC) yang selalu mengalir kearah barat, yang membawa massa air dari daerah tropis termasuk massa air ARLINDO (Gambar 8A dan Gambar 8B).

perairan Samudera Hindia yang berdekatan dengan daratan Sumatera membelok ke selatan ketika mendekati perairan Samudera Hindia barat daya Sumatera (Gambar 8A dan Gambar 8B). Arus tersebut relatif kuat pada lapisan permukaan hingga pada kedalaman 150 m, kemudian melemah pada lapisan berikutnya.

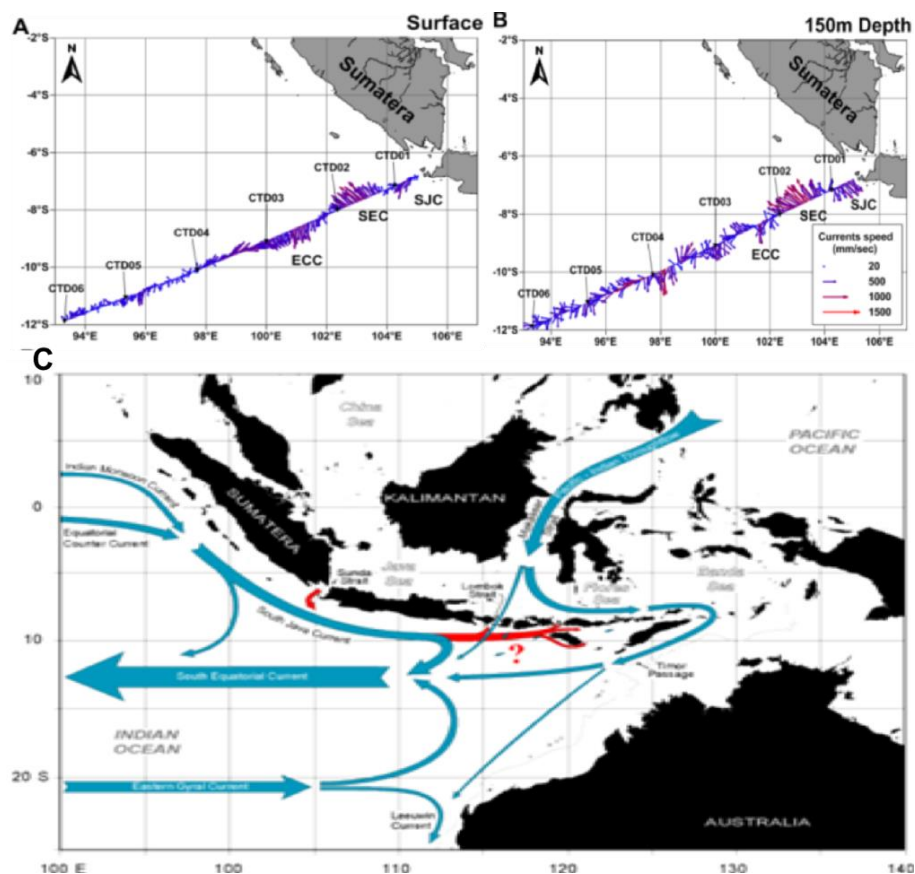
Sedangkan arus yang terbentuk yang merupakan perpanjangan arus ECC yang mengalir sepanjang pantai Barat Sumatera hingga ke selatan Jawa. Arus ini dikenal sebagai Arus Pantai Jawa (SJC) [6]. SJC terdeteksi di sekitar stasiun CTD 01 kecuali pada lapisan permukaan, SJC terpengaruh oleh arus yang berasal dari Selat Sunda (Gambar 8A). Arus ECC ini akan bertemu dengan SEC yang berasal dari timur di barat daya Sumatera bagian selatan. Akibat pertemuan arus yang membawa massa air yang berbeda, massa air dari arah barat Samudera Hindia memiliki densitas lebih rendah dan massa air dari arah timur mengalir dengan densitas yang lebih tinggi.

Selain SEC yang bergerak ke arah barat, pada bagian ekuator di Samudera Hindia Barat Sumatera juga terdapat arus kuat yang bergerak ke arah Timur yang dikenal dengan Arus Balik Khatulistiwa (ECC). Arus tersebut mengalir ke selatan dan kemungkinan besar sebagaimana ditemukan di antara CTD 03 dan CTD 02. Arus ECC ini membawa massa air dari wilayah perairan Samudera Hindia bagian barat ke

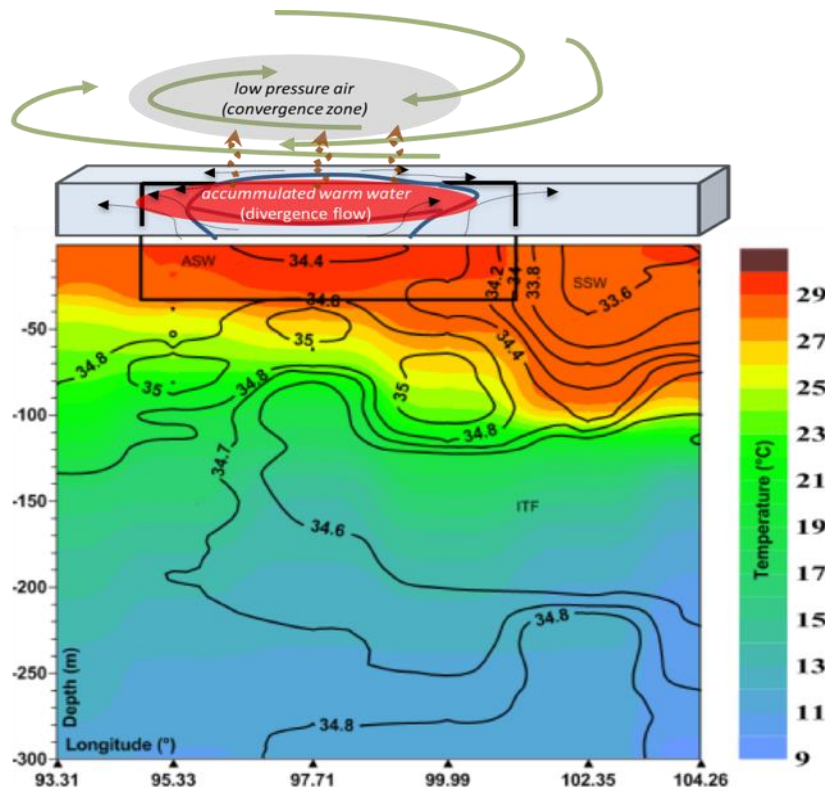
Massa air ARLINDO sebagaimana telah ditemukan oleh beberapa penelitian sebelumnya [9], [10] memiliki nilai salinitas yang hampir spesifik homogen 36.6 PSU. Penelitian menggunakan 23 stasiun CTD di sepanjang Selat Makassar hingga Selat Lombok yang dilakukan oleh P2O LIPI juga mengindikasikan konsistensi salinitas pada rentang

nilai ini. Dengan densitas air laut lebih tinggi yang mengalir di lapisan bawah akan menyebabkan efek buoyancy lebih kuat yang menyebabkan pengangkatan kolom massa air dengan suhu dan salinitas lebih tinggi intrusif ke permukaan. Sebagai konsekuensinya, terdapat kolam air hangat $> 27^{\circ}\text{C}$ di daerah tersebut yang ditandai oleh perbedaan suhu yang relatif tinggi dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Sementara itu, massa air yang berasal dari daerah tropis Samudera Hindia bagian selatan semakin besar sehingga mendesak massa air yang berasal dari Samudera Hindia bagian barat ke permukaan (Gambar 8A dan Gambar 8B). Secara skematik terbentuknya kolam hangat akibat penyusupan massa air akibat arus SEC dan pengangkatan massa air akibat arus ECC disajikan pada Gambar 9. Pada gambar 9, kami bersintesa bahwa terdapat interaksi laut-atmosfer yang saling mendukung dan timbal balik yang terjadi pada saat berkembang pusat tekanan rendah di Samudera Hindia barat daya Sumatera. Dari bawah permukaan hingga kedalaman 150 m, terdapat massa air intrusif

akibat perbedaan atau variasi lateral densitas yang berpengaruh pada buoyancy air laut sehingga memunculkan kolam air yang lebih hangat dari sekitarnya. Akumulasi air hangat dekat permukaan tersebut dapat menyebabkan permukaan laut yang relative lebih tinggi disebabkan oleh ekspansi termal. Hal tersebut juga diperluas oleh mekanisme aliran divergen (keluar) air laut. Sementara itu, secara langsung keberadaan kolam air hangat yang memenuhi $>27^{\circ}\text{C}$ menjadi area yang cocok bagi berkembangnya area bertekanan atmosfer rendah di atasnya yang menjadi pusat pusaran dan zona konvergensi masa udara. Sebagai konsekuensinya, pada daerah Samudera Hindia barat daya Sumatera ini sering terbentuk pusat tekanan rendah dan bahkan dapat berkembang menjadi badai tropis yang berasosiasi dengan per-awan-an dan hujan yang tinggi. Keberadaan pusaran atmosfer ini juga pada akhirnya akan berinteraksi dengan permukaan laut dalam proses upwelling/pengangkatan kolom massa air laut dekat permukaan akibat pusaran siklonik atmosfer di atasnya.



Gambar 8. Rajah arus pada (A) lapisan permukaan, pada (B) kedalaman 150m di perairan Samudera Hindia barat dari olahan data SADCP, dan (C) Konseptual Sirkulasi Permukaan Arus Samudera Hindia bagian timur dan Arus Lintas Indonesia sebagaimana diadopsi dari Murgese *et al*[11] dan Sprintall *et al* [13].



Gambar 9. Model konseptual interaksi lautan-atmosfer di perairan Samudera Hindia barat daya Sumatera sebagai sintesa dalam penelitian ini.

4. Kesimpulan

Dari analisis data arus, suhu, salinitas, dan data meteorologis sebagaimana pembahasan di atas, kami berkesimpulan:

- terdapat interaksi timbal balik laut-atmosfer pada saat berkembangnya pusat tekanan rendah di Samudera Hindia barat daya Sumatera.
- terdapat kolom air yang lebih hangat ($>28^{\circ}\text{C}$) dari sekitarnya yang berasosiasi dengan pusat tekanan rendah atmosfer di atasnya. Kolam air hangat berasal dari massa air intrusif akibat perbedaan atau variasi lateral densitas yang berpengaruh pada buoyancy air laut.
- massa air intrusif tersebut diduga berkaitan dengan penetrasi massa air ARLINDO yang membawa massa air Samudera Pasifik melalui Selat Makassar dan Perairan Indonesia lainnya di bagian timur yang mengalir ke barat di Samudera Hindia selatan Jawa bergabung dengan Arus Selatan Katulistiwa.
- Pusat tekanan rendah di Samudera Hindia barat daya Sumatera dapat berkembang menjadi badai tropis yang berasosiasi dengan per-awan-an dan hujan yang tinggi.
- pusaran atmosfer yang terbentuk juga pada akhirnya akan mempengaruhi permukaan laut dengan proses upwelling/ pengangkatan kolom massa air laut dekat permukaan akibat pusaran siklonik atmosfer di atasnya.

Meskipun demikian, sintesa ini perlu diuji dengan data yang lebih panjang untuk menilai konsistensi dugaan massa air ARLINDO tersebut. Data bawah permukaan laut yang didapat melalui survey Indonesia Prima ini memang unik dan spesifik untuk lokasi pusat tekanan rendah barat daya Sumatera, namun data buoy RAMA di sekitar wilayah ini dapat juga diharapkan untuk dikajilanjut.

UcapanTerimaKasih

Terimakasih kami sampaikan kepada Pusat Meteorologi Maritim – BMKG, P2O LIPI dan Kapal Riset Baruna Jaya VIII yang telah memberikan fasilitas sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan sesuai dengan Rencana Kegiatan Survey Data Oseanografi “Indonesia PRIMA2017” berdasarkan Perjanjian Kerja Sama KS.301/004/KMM/I/2017 dan B-264/IPK.2/KS/I/2017 dengan biaya APBN DIPA BMKG Tahun 2017.

Daftar Pustaka

- [1] Hendon, H.H., 2003. Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air–Sea Interaction, *Journal of Climate*, 2003 16:11, 1775-1790
- [2] Boer, R., K.A. Notodiputro, I. Las, 2007., Prediction of daily rainfall characteristics from monthly climate indices, *Jurnal Agromet Indonesia* 21 (1): 12 – 20, 2007

- [3] Aldrian, E., dan R. D. Susanto, 2003, Identification of Three Dominant Rainfall Regions Within Indonesia and Their Relationship to Sea Surface Temperature, *International Journal of Climatology*, 23: 1435-1452. Wiley InterScience.
- [4] W. Estiningtyas, F. Ramadhani dan E. Aldrian, 2007. Analisis Korelasi Curah Hujan dan Suhu Permukaan Laut Wilayah Indonesia, serta Implikasinya untuk Prakiraan Curah Hujan (Studi Kasus Kabupaten Cilacap), *Jurnal Agromet Indonesia* 21 (2): 46 – 60, 2007.
- [5] Website resmi BMKG, 2017. <http://www.bmkg.go.id/pressrelease/siaranperskondisicuacamenjelangkahirfebruar2017>
- [6] Wyrtki, Klaus, 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. NAGA report, volume 2, Scientific Results of Marine Investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961.
- [7] Lambaerts, J., G. Lapeyre, R. Plougonven, and P. Klein (2013), Atmospheric response to sea surface temperature mesoscale structures, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 9611–9621, doi:10.1002/jgrd.50769.
- [8] Emery W.J., Baldwin D, Schluessel P and Reynolds RE, 2001. Accuracy of in situ sea surface temperatures used to calibrate infrared satellite measurements, *Journal of Geophysical Research*, Volume 106, Issue C2, pp: 2387–2405.
- [9] Jaswal, A. K., Virendra Singh and S. R. Bhambak, 2012. Relationship between sea surface temperature and surface air temperature over Arabian Sea, Bay of Bengal and Indian Ocean. *Journal Indian Geophysics Union* (April 2012) Vol.16, No.2, pp. 41-53.
- [10] Susanto, R. D., A. Field, A. L. Gordon, and T. R. Adi, 2012. Variability of Indonesian throughflow within Makassar Strait, 2004–2009, *Journal of Geophysical Research*, 117, C09013, <https://doi.org/10.1029/2012JC008096>.
- [11] Sprintall, J., J. T. Potemra, S. L. Hautala, Nancy A. Bray, Wahyu W. Pandoe, 2003. Temperature and salinity variability in the exit passages of the Indonesian Throughflow, In *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Volume 50, Issues 12–13, 2003, pp: 2183–2204, ISSN:0967-0645, [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(03\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(03)00052-3).
- [12] Murgese, D. S., Patrick De Deckker, 2005. The distribution of deep-sea benthic foraminifera in core tops from the eastern Indian Ocean, In *Marine Micropaleontology*, Volume 56, Issues 1–2, 2005, Pages 25-49, ISSN 0377-8398, <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2005.03.005>
- [13] Sprintall, J., S.E. Wijffels, R. Molcard, and I. Jaya, 2009. Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 114, 19, 2009.
- [14] Kawai, Y., Tomita, H., Cronin, M. F., and Bond, N. A. (2014), Atmospheric pressure response to mesoscale sea surface temperature variations in the Kuroshio Extension region: In situ evidence, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 8015–8031, doi:10.1002/2013JD021126.