

ANALISIS MASA AIR DAN ESTIMASI TRANSPOR ARUS BAWAH EKUATOR PADA BUJUR 90°BT SELAMA INDONESIA PRIMA 2017

WATER MASS ANALYSIS AND ESTIMATED TRANSPORT OF EQUATORIAL UNDERCURRENT AT 90°E DURING INDONESIA PRIMA 2017

Edi Kusmanto¹, Siswanto², Michael J. McPhaden³

¹Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Jakarta

²Pusat Meteorologi Maritim, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta

³PMEL Laboratory, National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA), USA

*E-mail korrespondensi: siswanto@bmkgo.id

Naskah masuk: 01 September 2018; Naskah diperbaiki: 04 Maret 2019; Naskah diterima: 09 April 2019

ABSTRAK

Arus bawah permukaan khatulistiwa (*Equatorial Undercurrent, EUC*) memainkan peran penting dalam dinamika Samudra Hindia bagian timur. EUC menyuplai massa air dengan salinitas tinggi yang masuk ke perairan Indonesia. Artikel ini mengkaji EUC dan analisis massa airnya di Samudra Hindia bagian timur pada bujur 90°BT dari lintasan 2°LS – 2°LU pada tanggal 1 – 3 Maret 2017 yang merupakan bagian dari ekspedisi “Indonesia Initiative on maritime Observation and Analysis” (Indonesia Prima 2017). Hasil analisis data suhu, salinitas, dan sigma – t yang diperoleh dari instrumen *conductivity, temperature and depth* (CTD) pada lima stasiun (CTD11–CTD14) dan profil arus dari *Shipboard Acoustic Doppler Current Profiles* (SADCP) menunjukkan adanya asupan massa air bersalinitas tinggi dari Laut Arab (*Arabian Sea High Salinity Water, ASHSW*) yang dicirikan oleh salinitas maksimum (35.15 - 35.2 PSU) pada rentang suhu 18°C - 23°C dan densitas 23 – 25 kg/m³. ASHSW dibawa oleh EUC dari Samudra Hindia bagian barat pada lapisan termoklin atas. Ditemukan bahwa EUC selama penelitian ini memiliki kecenderungan karakteristik berupa asimetris lebih kuat ke arah utara khatulistiwa. EUC mengalir ke timur dengan kecepatan maksimum 94 cm/s. Estimasi transpor massa air pada poros EUC berdasarkan kontur salinitas 35.15 dan 35.2 PSU masing masing sebesar ~3.4 Sv dan ~1.4 Sv, sedangkan pada salinitas 35.00 – 35.10 PSU sebesar ~8.7 Sv. Estimasi total transpor massa air EUC pada penelitian ini sebesar ~13.5 Sv.

Kata kunci: Indonesia PRIMA, Arus bawah permukaan khatulistiwa, Samudra Hindia, massa air laut, aliran.

ABSTRACT

Equatorial Undercurrent (EUC) plays an important role in the dynamic of the eastern Indian Ocean. EUC supplies water masses with high salinity into Indonesian waters. This article examines the EUC and its water mass analysis at 90°E across 2°S - 2°N on 1st - 3rd March 2017 which is part of the Initiative on Maritime Observation and Analysis Expedition (Indonesian Prima 2017). The analysis of temperature, salinity, and sigma-t data obtained from conductivity, temperature and depth (CTD) instruments at five stations (CTD11-CTD14) and current profiles of Shipboard Acoustic Doppler Current Profiles (SADCP) indicates the presence of high speed water column flowing the Arabian Sea High Salinity Water (ASHSW) as characterized by maximum salinity (35.15 - 35.2 PSU) within a temperature range of 18°C - 23°C and density of 23 - 25 kg/m³. ASHSW is carried by EUC from the western Indian Ocean at the upper thermocline layer. It was found that EUC during this study had a tendency to be asymmetrically stronger to the north of the equator. The analysis shows a maximum speed of 94 cm/sec and a transport estimated of EUC water masses based on salinity contour 35.15 and 35.2 PSU respectively of ~3.4 Sv and ~1.4 Sv, while at salinity 35.00 - 35.10 PSU of ~8.7 Sv. The total estimated EUC mass transport calculated in this study is ~13.5 Sv.

Keywords: Indonesia PRIMA, Equatorial Undercurrent, Indian Ocean, water mass, transport.

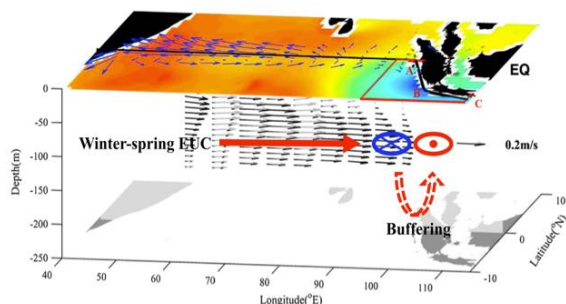
1. Pendahuluan

Arus bawah ekuator atau *Equatorial Undercurrent* (EUC) adalah aliran massa air ke arah timur yang kuat pada lapisan bawah permukaan di wilayah khatulistiwa (equator) yang terjadi di Samudra Atlantik, Hindia, dan Pasifik. Hingga kini ada dua

penggerak utama EUC yang diketahui, yaitu angin pasat tenggara yang bertiup di atas zona khatulistiwa dan konvergensi arus nonlinier ekuator timur. Konvergensi arus nonlinier timur ke arah ekuator (dengan mempertimbangkan perubahan notasi matematis akibat arah dan gaya coriolis antara belahan bumi utara dan selatan)

menyebabkan arus bawah yang kuat di sekitar khatulistiwa [1].

Kecepatan maksimum EUC berbeda-beda dan tergantung pada wilayah samudera dan musimnya. Kecepatan maksimum EUC di Samudra Pasifik (sering disebut arus *Cromwell*) lebih dari 150 cm per detik [2], di Samudra Atlantik (sering disebut arus *Lomonosov*) dengan kecepatan sekitar setengah dari arus *Cromwell*. Di Samudra Hindia, EUC sering disebut sebagai jet ekuator bawah permukaan yang kuat dan tidak sepanjang tahun ada.



Gambar 1. Sketsa EUC musim dingin – musim semi. Warna merah (biru) pada permukaan laut mengindikasikan anomaly suhu muka laut yang lebih hangat (dingin). Garis panah arah vertikal menunjukkan profil kecepatan EUC, diambil dari [3].

EUC di Samudra Hindia sudah diketahui merupakan fenomena musiman [4]. Fenomena tersebut terjadi di musim dingin saat monsun timur laut berkembang, dan lenyap di musim panas saat terjadi monsun barat daya [1,3] (Gambar 1), dengan kecepatan arus antara 50-100 cm/sec [4]. Magnitudo arus tersebut relatif lebih kuat di Samudra Hindia timur [6] mengalir ke arah timur dan dapat ditemukan di lapisan termoklin kuat (*pycnocline*) di bawah lapisan campuran atas (*upper mixing layer*). Pusat dari keberadaan EUC terletak pada garis khatulistiwa dengan rentang $\pm 1^\circ$ lintang utara – selatan dan memiliki ketebalan vertikal sekitar 100 m pada lapisan termoklin bujur timur 60°BT selama periode monsun timur laut. Rao dan Jayaraman, [7] mengamati adanya EUC pada kedalaman antara 50 m dan 150 m di khatulistiwa pada rentang lintang 2°LS dari 61° – 63°BT selama Januari-Februari 1963. Sementara itu, Bruce [5] telah mengamati EUC di Samudra Hindia barat memiliki pusat pada kedalaman sekitar 75 m pada saat berlangsungnya monsun barat laut. EUC di Samudra Hindia memiliki kecenderungan asimetris, lebih kuat ke arah selatan dibandingkan dengan ke arah utara khatulistiwa. Kondisi ini menunjukkan bahwa variasi EUC musiman dipicu oleh perubahan angin musim [8].

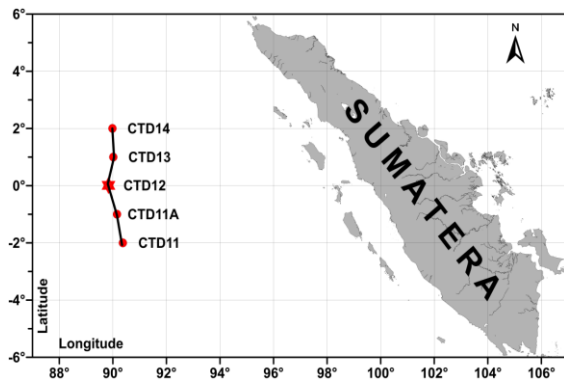
Pelayaran Ilmiah atau Ekspedisi Indonesia PRIMA 2017 (“*Indonesia Initiative on maritime Observation and Analysis 2017*”) oleh BMKG/LIPI/NOAA yang dilaksanakan pada tanggal 20 Februari – 16 Maret 2017 mengambil sampel data atmosfer dan oseanografi di wilayah Samudra Hindia bagian timur sekitar bujur 90°BT menyeberangi garis ekuator. Terdapat 5 stasiun sampel oseanografi yang diperoleh dari peralatan *Conductivity Temperature Depth* (CTD) yang sesuai dengan deskripsi penelitian-penelitian sebelumnya terkait EUC di Samudra Hindia.

Arus EUC memainkan peran penting dalam proses iklim global dan siklus biogeokimia, CO_2 dan produktivitas primer [9]. Karena EUC secara dinamis terbatas hanya di khatulistiwa, hanya sedikit terumbu karang di perairan pesisir yang mendapat manfaat dari peristiwa ini. Namun demikian, untuk membantu mengidentifikasi potensi perlindungan bagi komunitas terumbu karang dari perubahan iklim, perubahan pemanasan akibat EUC dapat dijadikan acuan penelitian bagi ketahanan atas sistem terumbu karang di perairan pesisir [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa karakteristik massa air, besaran arus EUC di Samudra Hindia pada bujur 90°BT dari lintang 2°LS hingga 2°LU dan estimasi transpor massa air yang bersalinitas tinggi dari Samudra Hindia bagian barat ke perairan khatulistiwa Samudra Hindia bagian timur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat melengkapi deskripsi EUC dari penelitian sebelumnya, menguji konsistensi kecepatan dan karakteristik EUC disebabkan analisis data pada penelitian ini berbeda dengan bujur dan wilayah Samudra Hindia yang telah dikaji sebelumnya, selain memberi informasi tambahan tentang karakteristik massa air, besaran arus EUC dan volume transpor massa air sesaat di Samudra Hindia timur yang berkontribusi pada massa air perairan dan variabilitas suhu muka laut dan iklim wilayah Indonesia barat Sumatera.

2. Materi dan Metode

Data yang digunakan adalah data yang diperoleh pada tanggal 1 – 3 Maret 2017 di perairan Samudra Hindia pada posisi lintang $2^\circ00'\text{LS}$ – $2^\circ00'\text{LU}$ sepanjang bujur $90^\circ00'\text{BT}$ yang merupakan bagian dari data yang diperoleh selama penelitian Indonesia Prima (Gambar 2). Indonesia Prima 2017 adalah program BMKG tahun 2017 dalam rangka survey data dan penelitian oseanografi serta *maintenance buoy* permukaan laut yang berlokasi di Samudra Hindia timur menggunakan Kapal Riset Baruna Jaya VIII dengan melibatkan peneliti dari P2O LIPI dan NOAA.



Gambar 2. Lokasi dan sampling data pengamatan lima stasiun CTD SBE electronics type 911 plus dan lintasan ADCP di Samudera Hindia selama pelayaran Indonesia Prima 2017 di sekitar bujur 90°BT. Terdapat 11 lokasi pengamatan CTD latitudinal sepanjang 12°LS–8°LU, selain stasiun lainnya sepanjang rute pelayaran.

Parameter suhu, salinitas dan *sigma-t* (densitas–1000) pada setiap stasiun pengamatan untuk setiap kedalaman diukur secara kontinyu dengan *Conductivity Temperature Depth* (CTD) tipe SBE 911+ *Seabird Electronic Inc.* dari permukaan hingga kedalaman 1000 m, kecuali pada stasiun CTD12 hingga kedalaman 2930 m. Data diproses dan dikonversi menjadi data ASCII menggunakan perangkat lunak *SBE data processing-Win32* dan dirata-ratakan setiap 1 m. Data tersebut selanjutnya ditampilkan dalam bentuk profil vertikal suhu, salinitas, dan densitas.

Profil arus direkam secara kontinyu menggunakan *Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler* (SADCP) berfrekuensi 75 kHz. Peralatan ini memiliki zona kosong pasca transmisi (*blank after transmit zone*) 8 m ditambah dengan lunas kapal 4.3 m sehingga kedalaman teratas pengukuran adalah 12.3 m sampai pada kedalaman 500 m dari permukaan dengan bin vertikal setiap 5 m. Pengukuran profil arus di sepanjang lintasan dari stasiun CTD 11 hingga CTD 14 dengan interval setiap 2 detik dengan kecepatan rata-rata kapal 8 knot. Data terukur selanjutnya diekstrak menggunakan perangkat lunak WINADCP untuk mendapatkan kecepatan dan arah arus, arus zonal (*u*) dan arus meridional (*v*) dalam format ASCII. Proses kontrol kualitas data dilakukan dengan menghilangkan data pencilan (*outlier*) akibat *percent good* dibawah 50% dan koefisien korelasi dibawah 0.8, serta mengeliminasi data abnormal akibat *signal global positioning system* yang lemah dan kecepatan arus lebih dari 250 cm/sec.

Dalam penelitian ini, **estimasi transpor sesaat** (*Q*) dihitung berdasarkan hasil penjumlahan matematis pada area *gridding* penampang melintang kecepatan

arus zonal di khatulistiwa mulai dari 2°LS hingga 2°LU pada bujur 90°BT mengikuti kontur salinitas menggunakan persamaan :

$$Q = \sum_{i=1}^{i=100} V_i \cdot A_i \quad (1)$$

dengan *V_i* adalah kecepatan arus sejajar equator (*along equator velocity*) pada sel ke-*i* sedangkan *A_i* adalah luas penampang pada sel ke-*i*. Nilai *V_i* dihitung menggunakan persamaan:

$$V_i = v_i \cos \theta + u_i \sin \theta \quad (2)$$

Notasi θ adalah orientasi sudut yang dibentuk terhadap arah utara; *v_i* dan *u_i* adalah kecepatan arus zonal dan meridional sel ke-*i*. Sedangkan luas penampang sel ke-*i* (*A_i*) dihitung sebagai perkalian antara jarak vertikal bin (5 m) dengan jarak antarsel (jarak antar titik pengukuran arus).

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Massa Air Ekuator. Analisis profil kedalaman untuk parameter suhu, salinitas dan hubungan antara keduanya dalam bentuk diagram *T-S* hingga kedalaman 1000 m disajikan pada Gambar 3A dan 3B untuk seluruh stasiun pengamatan CTD, kecuali pada stasiun CTD 12 pada kedalaman 2930 m. Diagram *T-S* menunjukkan setidaknya terdapat empat massa air yang berbeda (Gambar 3.C). Massa air dengan salinitas rendah terdapat di lapisan permukaan, dengan kisaran antara nilai salinitas 33.90 - 34.80 PSU dengan suhu air laut bervariasi antara 28.0°C – 29.0°C dan kerapatan air (densitas), $\sigma=21.0$ -22.0 kg/m³. Pada lapisan kedua, terdapat massa air bersalinitas tinggi dengan kisaran salinitas 35.15 - 35.20 PSU dengan suhu berkisar 18.0 – 23.0°C dan densitas $\sigma=24.5$ -25.5kg/m³. Lapisan ketiga adalah massa air dengan salinitas 35.00 PSU, suhu 7.0 - 11.0°C dan $\sigma=26.5$ -27.5 kg/m³. Sedangkan lapisan keempat yang terdalam adalah massa air dengan salinitas 34.70 – 34.90 PSU, suhu 2.0°C-6.0°C, $\sigma=27.5$ -28.0 kg/m³. Selanjutnya massa air ke bawah tampak hampir homogen.

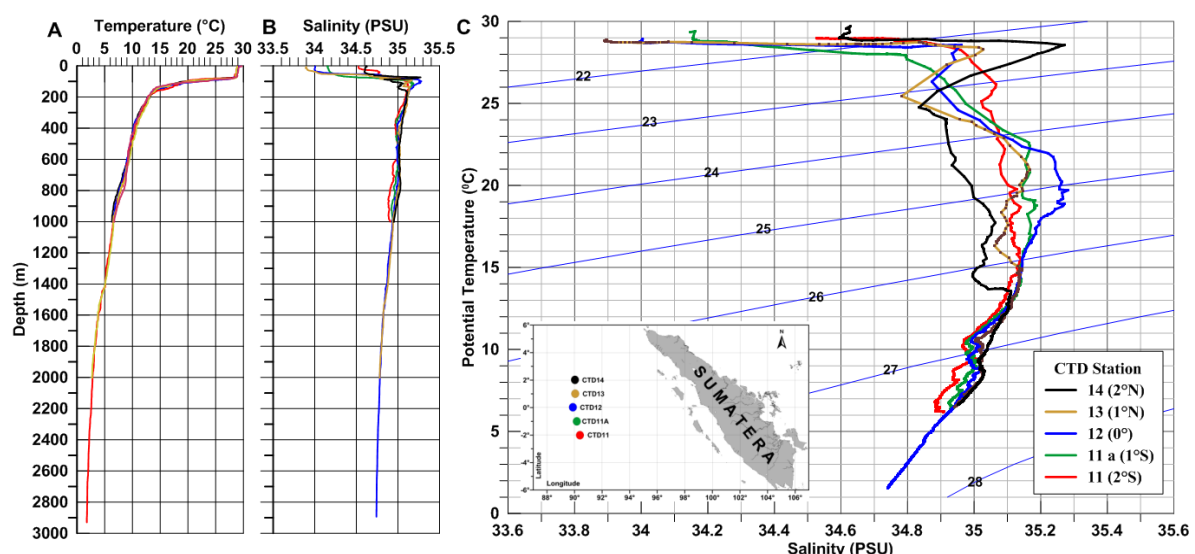
Deskripsi massa air tersebut menggambarkan massa air Samudera Hindia yang telah teridentifikasi oleh penelitian-penelitian sebelumnya, sebagai misal karakterisasi oleh You and Tomczak [11] yang menunjukkan kehadiran massa air yang berasal dari Teluk Benggala (Bay of Bengal, BOB) dilapisan permukaan, massa air Laut merah (*Red sea water*) dan massa air Teluk Persia (*Arabian Sea High Salinity Water*, ASHSW), massa air Laut Australasia - Mediteranian (*Australasian Mediterranean water*, AAMW) dan massa air Samudera Hindia tengah (*Indian Central Water*, ICW).

Berdasarkan diagram T-S pada Gambar 3C, terkonfirmasi juga bahwa massa air dengan salinitas rendah di lapisan permukaan mengindikasikan kehadiran massa air gabungan antara massa air lokal dengan curah hujan tinggi, aliran masuk massa air bersalinitas rendah dari utara – timur laut Samudera Hindia yang disebabkan oleh transpor ekman [13] dan massa air bersalinitas rendah AAMW yang mengalir bersama dengan Arus lintas Indonesia (ARLINDO) atau *Indonesian Throughflow* (ITF) ke arah barat yang bergabung dengan dominasi Arus Khatulistiwa Selatan (*South Equatorial Current*, SEC) [14].

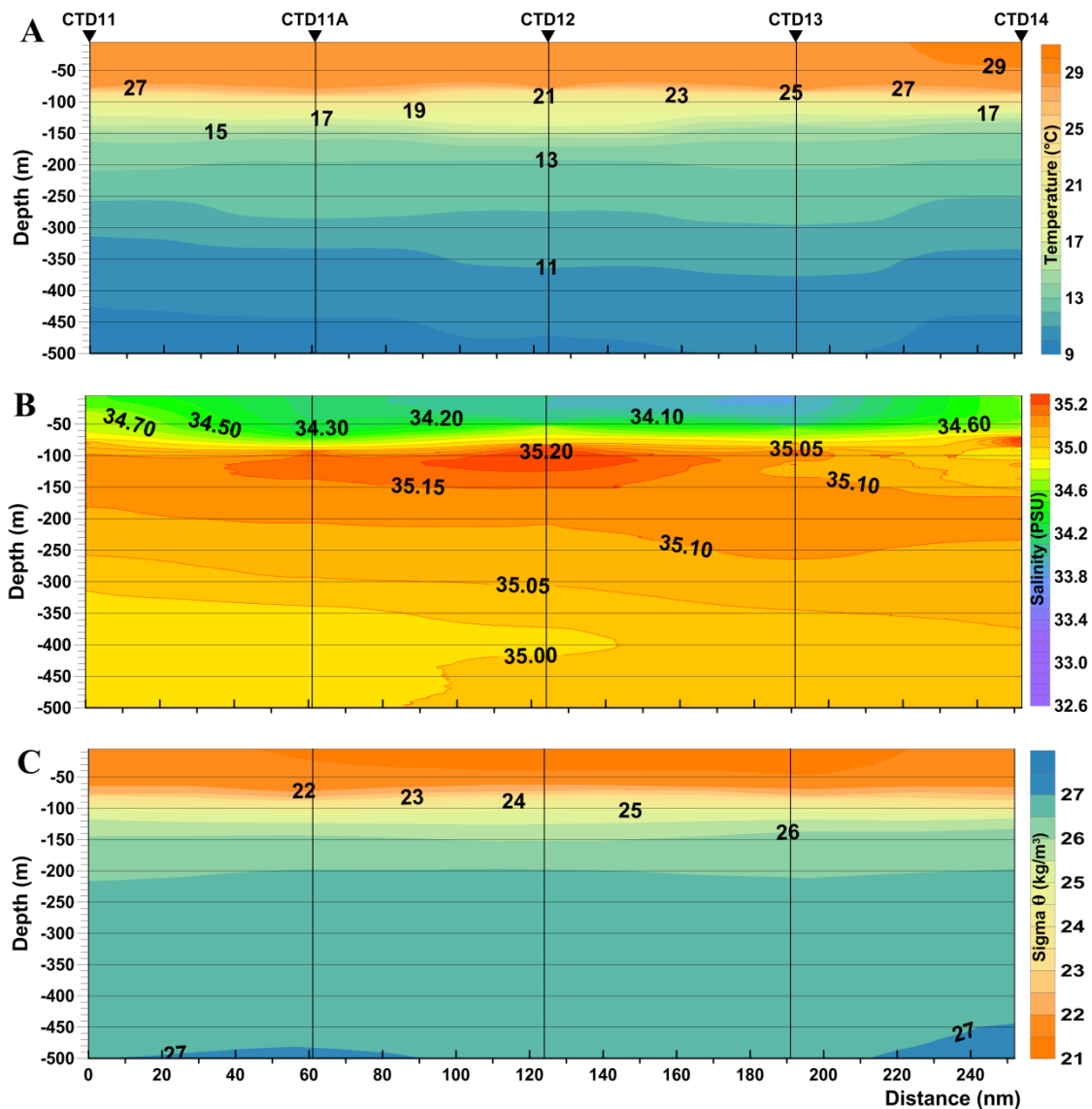
Massa air dengan salinitas tinggi di lapisan ke dua merupakan massa air dari Samudera Hindia barat yang berasal dari Laut Merah dan ASHSW, selain berasal juga dari massa air Samudera Hindia tengah (ICW). Pada lapisan dalam terdapat massa air dengan salinitas rendah dengan kisaran 34.9 PSU yang berada pada kedalaman lebih dari 1200 m (Gambar 3B) diduga kuat merupakan intrusi massa air AAMW oleh arus SEC [15]. Hasil ini mengkonfirmasi hasil deskripsi yang telah dilakukan oleh You & Tomczak pada laporan ilmiah mereka [11] atau buku Tomczak & Godfrey [12] pada Bab *Hydrology of the Indian Ocean* pada gambar 12.5 dan 12.6. Suhu pada lapisan permukaan tertinggi dijumpai di lintang 2°N pada stasiun CTD 14 (29°C) yang menempati kedalaman 0 – 50 m sedangkan pada lintang 1°LU hingga 2°LS relatif homogen pada kisaran 27°C-28°C dan menempati kedalaman 0 – 90 m (Gambar 3.A dan Gambar 4.A). Lapisan dekat permukaan ini sering disebut sebagai lapisan percampuran (*mixed layer depth*, MLD) yang memiliki suhu yang hampir seragam dan paling tinggi pada variasi vertikal suhu terhadap kedalaman.

MLD dihitung sebagai kedalaman dimana densitasnya sama dengan kerapatan permukaan laut ditambah kenaikan kerapatan setara dengan kenaikan suhu 0.8°C. Peningkatan densitas ini ditentukan oleh koefisien ekspansi termal, yang dihitung sebagai fungsi suhu permukaan laut (SST) dan salinitas permukaan laut (SSS) [16]. Variabilitas MLD sering dikarakterisasikan hanya dari profil suhu [17], namun sebenarnya variasi salinitas juga penting dengan anggapan bahwa variasi salinitas menghasilkan adveksi horizontal dari massa air dengan salinitas rendah. Fluks massa air bersalinitas lebih rendah juga akan mereduksi fluks *buoyancy* yang akan mereduksi batas atas dan batas bawah pencampuran [18].

Lapisan berikutnya adalah lapisan dengan suhu 13°C – 26°C yang kita anggap merupakan lapisan termoklin (Gambar 4A). Lapisan termoklin ditentukan berdasarkan gradien suhu vertikal maksimum. Nilai absolut gradien penurunan suhu vertikal pada lapisan termoklin (untuk daerah Samudera Hindia) adalah sebesar 0,05°C/m [19]. Sebaran termoklin pada stasiun pengamatan menunjukkan bahwa kedalaman lapisan termoklin relatif homogen (gradien suhu antara 0.05 – 0.6°C/m), kecuali pada CTD 12 di lintang 0°. Lapisan termoklin batas atas berada pada kedalaman 90 m sedangkan batas bawah berada pada kedalaman 150 m pada lintang 2°LU dan 160 m pada lintang 2°LS dengan kisaran nilai suhu antara 13 – 26°C. Pada lintang 0°, batas bawah termoklin lebih dalam, yaitu 180 m. Lapisan ini mengalami perubahan suhu secara cepat, sebesar 13°C dalam 60 m – 90 m. Gradien suhu tertinggi (0.6 °C/m) berada pada kedalaman 90 – 100 m (Gambar 5A).



Gambar 3. Profil suhu A), Salinitas B) dan Diagram T – S, C) menggunakan data CTD yang dikoleksi selama penelitian Indonesia Prima 2017 sepanjang lintasan latitudinal 90°BT dari 2°LS hingga 2°LU di Samudera Hindia.



Gambar 4. Irisan suhu (A) salinitas (B) dan sigma-t (C) dari permukaan hingga kedalaman 500 meter dari stasiun CTD 11 – CTD 14 pada pelayaran Indonesia Prima 2017.

Pada lapisan kedalaman 150-500 m, suhu umumnya dijumpai berkisar antara 10-13°C. Pola stratifikasi pada stasiun CTD 13 berbeda dengan stasiun sekitarnya. Pada stasiun ini suhu yang lebih dingin terdesak oleh massa air yang lebih hangat di lapisan atasnya, sementara itu terjadi pengangkatan oleh massa air yang lebih dingin terjadi di stasiun CTD 11. Terdapat kemiringan lapisan massa air akibat distribusi suhu yang berbeda. Massa air dengan 11°C dan 12°C masing-masing berada pada kedalaman 260 m dan 320 m di selatan khatulistiwa (CTD 11) dan pada kedalaman 300 m dan 350 m pada stasiun CTD 13 (Gambar 4A).

Secara umum, pola sebaran salinitas di perairan sekitar khatulistiwa cenderung asimetris. Massa air pada lapisan permukaan mendapat tekanan dari massa air yang bersalinitas lebih rendah (34.00 PSU) dan massa air lintang 1°LU (33.89 PSU). Salinitas permukaan di utara dan di selatan khatulistiwa masing masing adalah 34.60 PSU dan

34.53 PSU. Kehadiran massa air dengan salinitas lebih rendah (33.8 PSU) di stasiun CTD 13 dan fluks panas di stasiun CTD 14 keduanya berkontribusi terhadap fluks gaya apung (*bouyancy*) dan dapat menyebabkan kedalaman lapisan campuran menjadi dangkal.

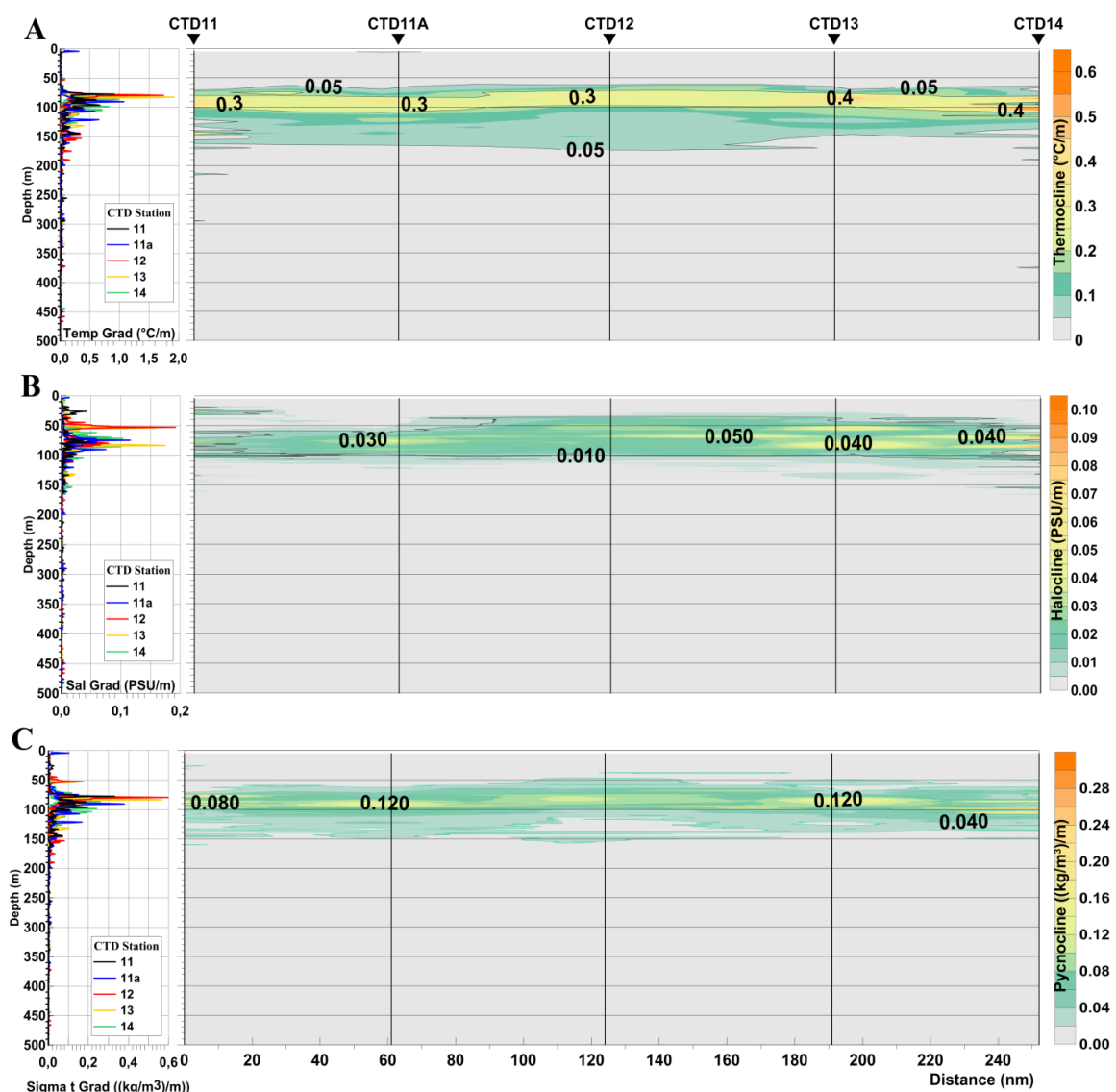
Pada lapisan kedalaman 90-150 m, massa air dengan salinitas tinggi (35.15-35.20 PSU) yang mengalir ke timur cenderung terdorong ke arah khatulistiwa bagian selatan hingga mencapai 1.5°LS dan mengalami pengenceran menjadi 35.15 PSU selama perjalanannya. Salinitas maksimum yang terdapat pada lapisan termoklin atas tersebut diduga kuat merupakan asupan massa air dari daerah Samudera Hindia bagian barat yaitu massa air ASHSW. Massa air yang sama menempati kedalaman 200-1000 m pada bujur 83°BT [14].

Lapisan selanjutnya diisi oleh massa air dengan salinitas 35.10 PSU hingga pada kedalaman yang

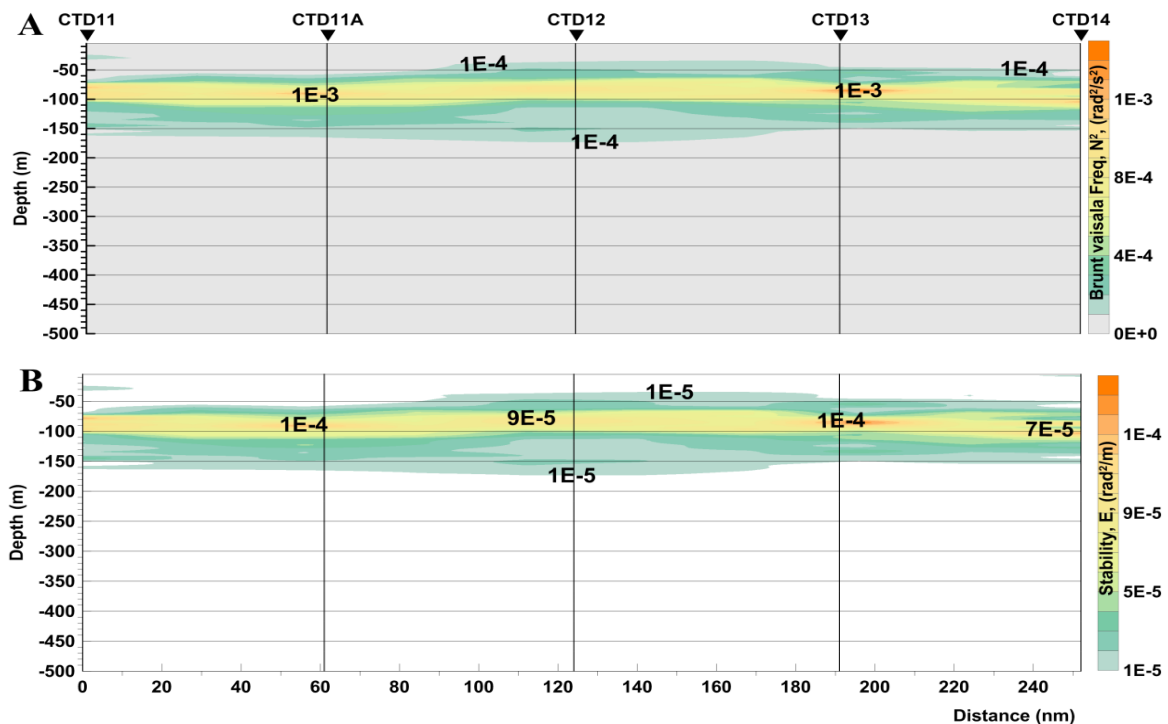
berbeda. Di khatulistiwa bagian selatan (2°LS) pada massa air tersebut dominan hingga kedalaman 180 m sedangkan pada lintang 0° , 1°LU dan 2°LU masing masing pada kedalaman 210 m, 260 m dan 230 m. Selanjutnya, massa air di lapisan dalam (300 m – 500 m) di khatulistiwa bagian selatan diisi oleh massa air dengan salinitas 35.00 PSU sedangkan di utara oleh massa air dengan salinitas 35.05 PSU (Gambar 4.B). Terdapat penerobosan massa air dengan salinitas lebih rendah (34.95 PSU) dari sisi selatan khatulistiwa pada kedalaman 320 m hingga mencapai lintang 0° pada kedalaman 375 m. Akibat penerobosan ini terjadi pola asimetris struktur massa air di lapisan bawah termoklin. Massa air dengan salinitas 35.10 PSU terangkat di selatan dan tenggelam di utara khatulistiwa (Gambar 4.B).

Lapisan dengan gradien salinitas tertinggi atau sering disebut lapisan *haloklin* berada pada kedalaman 90 m (Gambar 5B).

Densitas di lapisan permukaan (0-90 m) dijumpai antara $21.50\text{--}23.50\text{ kg/m}^3$, sedangkan di lapisan termoklin (90-150 m) nilainya antara $23.50\text{--}26.50\text{ kg/m}^3$, dan di lapisan bawah (150-500 m) densitas berkisar antara $26.50\text{--}27.00\text{ kg/m}^3$ (Gambar 4C). Lapisan dengan gradien densitas tertinggi atau lapisan *piknoklin* berada pada kedalaman 100 m. Asupan massa air dari daerah Samudera Hindia bagian barat yang dicirikan oleh salinitas maksimum (35.2 PSU), suhu $20^{\circ}\text{C}\text{--}23^{\circ}\text{C}$ mempunyai densitas $23\text{--}25\text{ kg/m}^3$ (Gambar 5C).



Gambar 5. Irisan gradient suhu A), gradient salinitas B) dan gradient sigma t C) dari permukaan hingga kedalaman 500 meter dari stasiun CTD 11 – 14 pada pelayaran Indonesia Prima 2017. Kolom paling kiri menunjukkan profil vertikal gradien per parameter untuk setiap stasiun pengamata CTD.



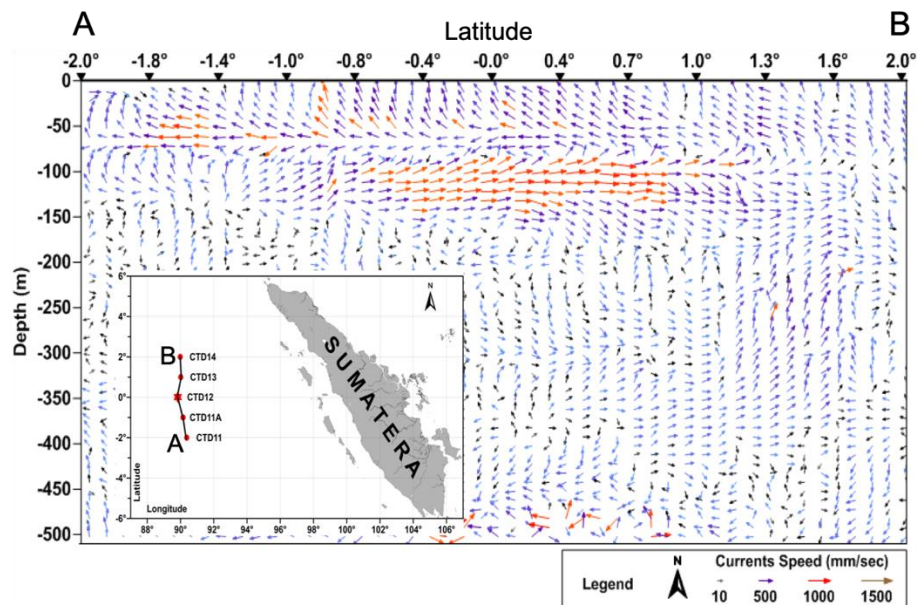
Gambar 6. Irisan Buoyancy A) dan stabilitas massa air B) dari permukaan hingga kedalaman 500 meter dari stasiun CTD 11 – CTD 14 pada pelayaran Indonesia Prima 2017.

Hasil perhitungan nilai frekuensi *Brunt Vaisala* untuk semua data CTD disajikan pada Gambar 6. Lapisan MLD memiliki nilai $0-10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$, sedangkan di lapisan termoklin antara $10^{-4}-1.4 \times 10^{-3} \text{ rad}^2/\text{s}^2$ dan lapisan dalam $10^{-4} \text{ rad}^2/\text{s}^2$. Lapisan termoklin memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan lapisan MLD dan lapisan dalam (Gambar 6.A). Menurut Pond and Pickard [20], nilai yang tinggi pada lapisan termoklin disebabkan karena pada lapisan ini terdapat lapisan piknoklin (gradien densitas meningkat secara tajam terhadap kedalaman). Semakin tinggi nilainya pada suatu lapisan maka stabilitas statis dari lapisan tersebut semakin besar, sebaliknya bila nilai semakin negatif maka kolom perairan semakin tidak stabil atau berada dalam kondisi instabilitas statis. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan termoklin merupakan lapisan yang paling stabil dibandingkan dengan lapisan MLD dan lapisan dalam yang hampir homogen.

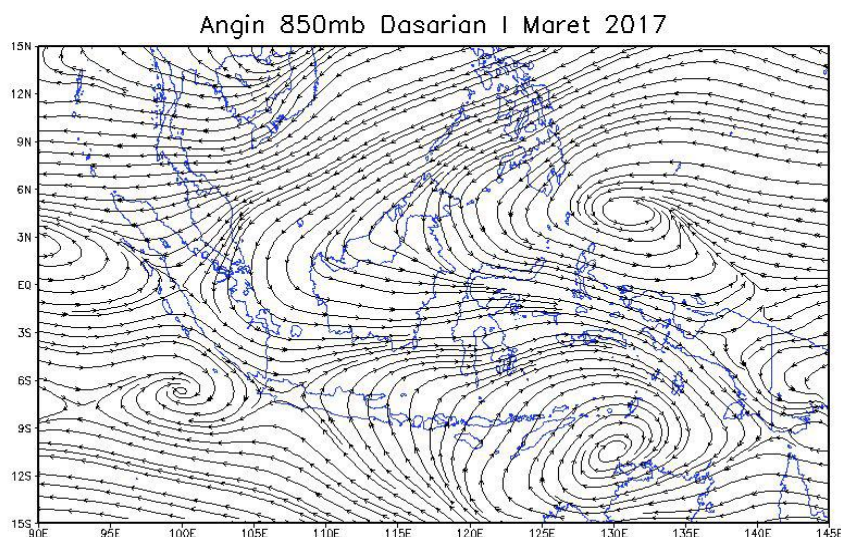
Stabilitas vertikal lapisan massa air yang dinyatakan dengan dengan nilai indeks stabilitas statik (E). Indeks stabilitas statik (E) berbanding lurus dengan frekuensi Brunt–Vaisala (N^2). Semakin tinggi indeks stabilitas statik suatu perairan makin stabil stratifikasi lapisan massa airnya [19].

Struktur Arus di Khatulistiwa Samudera Hindia Timur. Bagian ini akan membahas profil vertikal kecepatan dan arah arus dari permukaan hingga pada kedalaman 500 m di Samudera Hindia ekuator bagian timur ini. Pola arus pada lapisan permukaan (0 – 80 m) terutama di lintang $1^\circ\text{LS} - 2^\circ\text{LU}$ didominasi oleh arus yang mengalir ke barat – barat laut dengan kecepatan maksimum 80 cm/s, kecuali di lintang 2°LS terjadi pembalikan arus, sebagian menuju ke timur dari permukaan hingga pada kedalaman 50 m, Gambar 6. Dominasi arus ke barat - barat laut terutama diakibatkan oleh angin musim yang umumnya mulai berbalik arah pada bulan Maret 2017 (Gambar 7).

Angin musim merupakan pendorong sirkulasi permukaan di perairan khatulistiwa Samudera Hindia. Angin musim ini mempunyai kekuatan membalikkan sirkulasi massa air di lapisan permukaan di atas Samudra Hindia empat kali dalam setahun. Pada periode dasarian pertama bulan Maret 2017, aliran massa udara di wilayah Indonesia didominasi oleh angin baratan yang menjadi belokan angin khususnya di bagian selatan Sumatera, barat daya Jawa bagian barat (Gambar 8).



Gambar 7. Rajah arus pada irisan kedalaman terhadap lintang $2^{\circ}\text{LS} - 2^{\circ}\text{LU}$ hasil penelitian ini. Gambar inset menunjukkan posisi geografis dari irisan melintang dari lintasan SADCP dari A menuju B.



Gambar 8. Pola umum sirkulasi angin pada periode dasarian I Maret 2017 di wilayah Indonesia dan sekitarnya.

Pola angin di bagian utara ekuator pada lintang $3^{\circ}\text{LU} - 6^{\circ}\text{LU}$ menunjukkan dominasi ke arah barat sedangkan di ekuator hingga lintang 3°LS menunjukkan pembalikan arah angin, menuju ke barat. Kecepatan arus ke arah barat melemah ketika terjadi musim dingin atau musim panas dan menguat ke arah timur ketika musim peralihan pada bulan April – Mei dan Oktober – November [20].

Pada kedalaman 80 m – 150 m dari lintang $1.2^{\circ}\text{LS} - 1.5^{\circ}\text{LU}$ terdapat arus kuat yang mengalir ke arah timur dengan kecepatan maksimum 94 cm/s. Arus tersebut merupakan arus EUC yang memiliki kecenderungan asimetris lebih kuat ke arah utara khatulistiwa. Hasil ini berbeda dengan hasil yang telah diperoleh Taft and Knauss [8] yang

menyatakan bahwa arus EUC lebih kuat ke arah selatan dibandingkan dengan ke arah utara khatulistiwa. Arus ini membawa massa air yang bersalinitas tinggi yang merupakan asupan massa air dari daerah Samudera Hindia bagian barat yang dicirikan oleh salinitas maksimum ($35.0 - 35.2$ PSU), suhu $20^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$ dan densitas $23 - 25$ kg/m^3 . Pada kedalaman di bawah 150 m hingga kedalaman 500 m, arus di bagian utara khatulistiwa didominasi ke arah timur sedangkan di bagian selatan dominan arus ke barat dengan kecepatan yang relatif rendah.

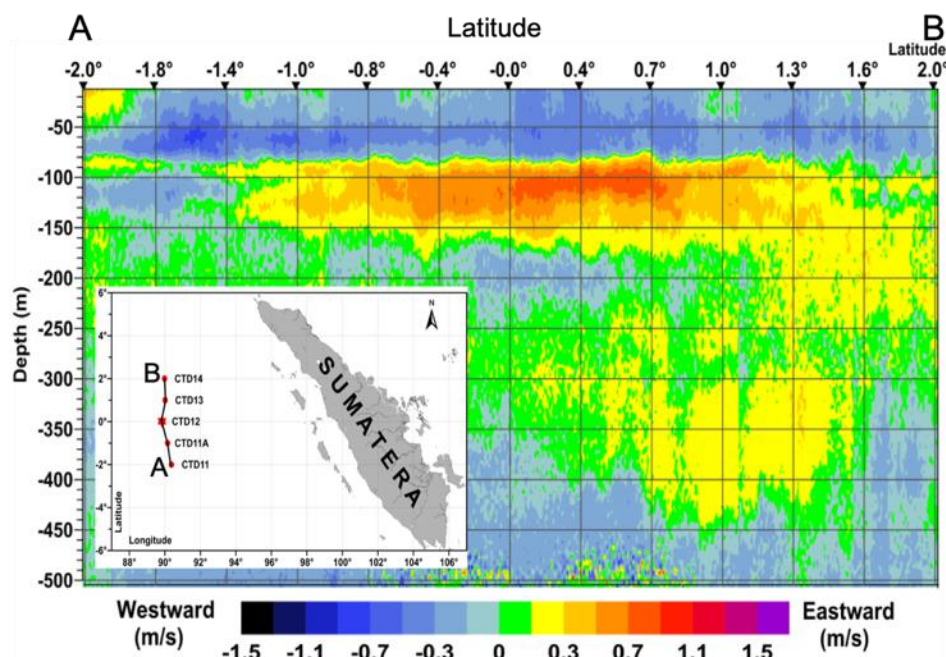
Arus EUC adalah bagian dari sirkulasi khatulistiwa di semua samudra, bersifat permanen di Samudera Atlantik dan Samudera Pasifik dan hadir secara

musiman di Samudera Hindia karena sirkulasi angin monsun. Variabilitas musiman EUC di Samudera Atlantik memasok massa air yang lebih dingin, salinitas yang lebih tinggi, kaya nutrisi dan produktivitas primer serta kesetimbangan panas [21]. Arus EUC di Samudera Hindia memasok massa air yang lebih hangat dengan salinitas tinggi di perairan Samudera Hindia timur barat Sumatera. Selain itu, massa air yang tertransportasi oleh arus EUC di Samudera Hindia mempunyai suhu yang lebih hangat mengalir ke selatan dalam bentuk arus *South Java Current* (SJC) sepanjang pesisir barat Sumatera hingga ke selatan Jawa setelah membentur batas arus timur Pulau Sumatera. Massa air ini kemudian terangkat ke permukaan oleh massa air yang lebih dingin yang berasal dari Samudera Hindia selatan oleh arus selatan khatulistiwa (SEC) dan diduga kuat membentuk kolom air hangat di perairan barat daya Sumatera dan berpengaruh terhadap curah hujan di Jawa bagian barat dan Sumatera bagian selatan (ditulis dalam paper terpisah sebagai hasil Indonesia Prima 2017).

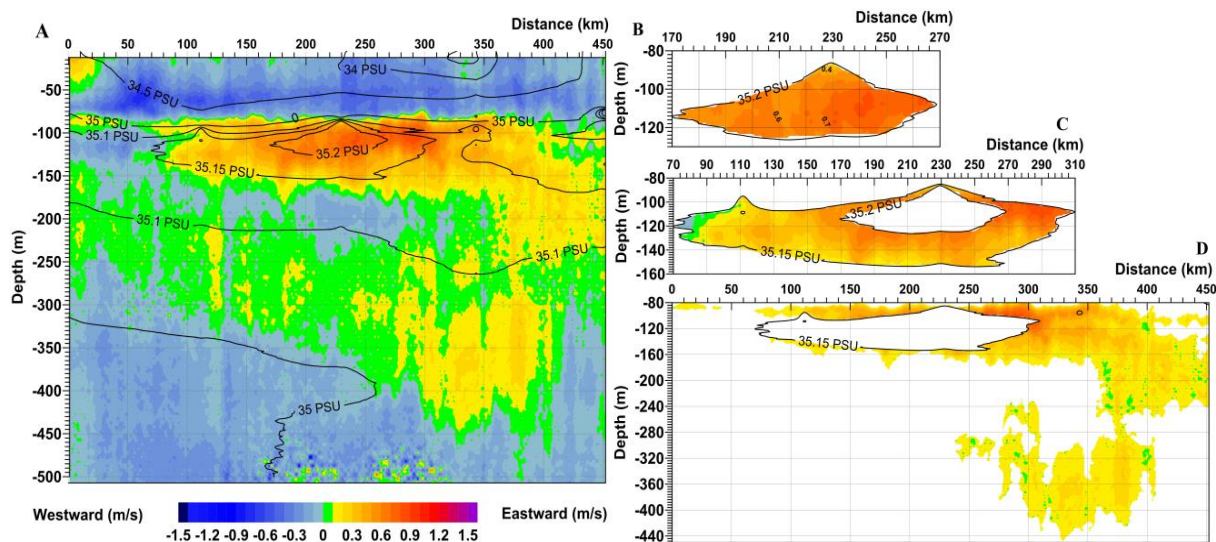
Profil vertikal komponen kecepatan arus dalam arah zonal (timur-barat) pada Gambar 9 memperlihatkan

aliran massa air yang kuat menuju timur yang dominan berada pada kedalaman 80 – 150 m (warna merah) dari lintang 1.2°LS-1.5°LU. Sedangkan pada lapisan permukaan dominasi arah arus ke barat, demikian juga pada kedalaman 250 – 500 m. Terjadi pembalikan arus antara arus EUC dengan arus pada lapisan permukaan.

Estimasi volume transpor. Perhitungan transpor massa air oleh arus EUC pada penelitian ini menggunakan komponen zonal yang menuju timur ditumpang-tindihkan dengan kontur salinitas, ditunjukkan oleh Gambar 10.A. Kontur salinitas kemudian dipakai untuk mendeskripsikan kolom massa air yang memiliki karakter serupa, dengan asumsi dinamika pergerakan massa air mengikuti karakteristik fisis air laut sebagaimana telah didiskusikan sebelumnya. Estimasi transpor massa air yang bersalinitas tinggi yang berasal wilayah barat Samudera Hindia, dibagi berdasarkan kontur salinitas 35.15 dan 35.20 PSU sebagai poros EUC dan yang bersalinitas 35.00 – 35.10 PSU sebagai bagian dari massa air bersalinitas tinggi yang ikut mengalir ke perairan timur Samudera Hindia (Gambar 10.A).



Gambar 9. Irisan melintang meridional arus EUC komponen arus zonal (komponen timur – barat) dalam satuan m/detik pada bujur 90°BT pada pelayaran Indonesia Prima 2017. Skala positif menunjukkan arah ke timur. Gambar inset menunjukkan posisi geografis dari irisan melintang dari intasan SADCP dari A menuju B.



Gambar 10. Irisan melintang meridional EUC komponen arus zonal (komponen timur – barat) identik dengan Gambar 8 yang ditumpangtindihkan dengan kontur salinitas A), volume transpor pada kontur salinitas 35.20 PSU B), 35.15 PSU C) dan 35.00 – 35.10 PSU D) pada pelayaran Indonesia Prima 2017.

Hasil estimasi transpor massa air berdasarkan kecepatan arus zonal pada poros EUC dengan kontur salinitas masing-masing 35.15 dan 35.20 PSU dengan luas penampang masing-masing 7940748 m² dan 2276190 m² adalah sebesar 3364682 m³/s (~ 3.4 Sv) dan 1377677 m³/s (~ 1.4 Sv) (Gambar 10B dan C). Sedangkan pada kontur salinitas 35.00 dan 35.10 PSU dengan luas penampang 39010584 m² adalah 8719226 m³/s (~ 8.7 Sv) (Gambar 10D). Total massa air dengan salinitas 35.0-35.2 PSU yang mengalir ke timur adalah sebesar ~13.5 Sv.

4. Kesimpulan

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah kehadiran tiga massa air yang berbeda. Massa air dengan salinitas rendah terdapat di lapisan permukaan, dengan kisaran antara 33.9-34.8 PSU, suhu 28°C-29°C, $\sigma_t=21-22$ kg/m³, yang kedua massa air bersalinitas tinggi dengan kisaran salinitas 35.15-35.2 PSU, suhu 18°C-23°C dan densitas $\sigma_t=24.5-25.5$ kg/m³ dan ketiga adalah massa air dengan salinitas 34.8-35 PSU, suhu 6°C-10°C, $\sigma_t=27-28$ kg/m³.

Terdapat arus EUC yang mengalir ke timur dengan kecepatan maksimum 94 cm/s. Arus EUC tersebut memiliki kecenderungan asimetris lebih kuat ke arah utara dibandingkan dengan ke arah selatan khatulistiwa. Arus EUC merupakan penyebab adanya asupan massa air dengan salinitas maksimum (35.15-35.2 PSU) dari daerah Samudera Hindia bagian barat pada lapisan termoklin atas. Estimasi transpor massa air pada poros EUC yaitu pada kontur salinitas 35.15 dan 35.20 PSU masing-masing sebesar 3364682 m³/s (~3.4 Sv) dan 1377677 m³/s (~1.4 Sv) sedangkan pada kontur

salinitas 35.0 sebesar 8719226 m³/s (~8.7 Sv). Total massa air yang mengalir ke timur sebesar ~13.5 Sv.

Diharapkan dari hasil analisis dan kesimpulan penelitian ini dapat menambah pemahaman baru terhadap modulasi variabilitas Samudera Hindia bagian timur yang memberi dampak pada variabilitas iklim di Benua Maritim Indonesia. Sebagaimana dituliskan oleh penelitian terbaru terkait arti penting EUC dalam menjaga kelangsungan *upwelling* perairan barat Sumatera [3] yang pada akhirnya menjadi modulator bagi variasi suhu muka laut di daerah tersebut. Hal ini berguna dalam peningkatan akurasi prediktabilitas iklim di wilayah Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

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 PRIMA 2017” 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] Philander S. G., 2008. Encyclopedia of Global Warming and Climate Change, Sage Publications, Inc., 2455 Teller Road, Thousand Oaks, California 91320, ISBN 978-1-4129-5878-3, DOI: 10.4135/9781412963893.n238.

- [2] Knauss, J. A., 1997. Introduction to physical oceanography. *Waveland Press*. pp. 148–151, ISBN 9781577664291.
- [3] Chen, G., W. Han, Y. Shu, Y. Li, D. Wang, and Q. Xie (2016), The role of Equatorial Undercurrent in sustaining the Eastern Indian Ocean upwelling, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 6444–6451, doi:10.1002/2016GL069433.
- [4] McPhaden M. J., 1986. The Oceanography Report, EOS, *American Geophysical Union*, Vol. 67, No. 40: 762-765.
- [5] Bruce, J., G., 1973. Equatorial undercurrent in the western Indian Ocean during the southwest monsoon, *Journal of Geophysical Research*, volume 78, DOI: 10.1029/JC078i027p06386.
- [6] Knauss, J. A., Taft B. A., 1964. Equatorial Undercurrent of the Indian Ocean, *Science*, Jan 24;143(3604):354-6, DOI: 10.1126/science.143.3604.354.
- [7] Rao, L.V.G. and Jayaraman, K. 1968a. Vertical distribution of temperature, salinity and density in upper 500 meters of the North Equatorial Indian Ocean during the north – east monsoon period. *Bulletin of the National Institute of Science of India*, No.38:123-148.
- [8] Taft and Knauss, 1967. Equatorial undercurrent of the Indian Ocean as Observed by the Lusiad Expedition. *Bull. Scripps Institute of Oceanography*, 9, 163 pp.
- [9] Drenkard E. J. and Karnauskas K. B., 2014. Strengthening of the Pacific Equatorial Undercurrent in the SODA Reanalysis: Mechanisms, Ocean Dynamics, and Implications, *Journal of Climate*, American Meteorological Society, Volume 27:2405-2416. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00359.1
- [10] Karnauskas K. B. & Cohen A. L., 2012. Equatorial refuge amid tropical warming, *Nature Climate Change letter* 2,530–534 DOI:10.1038/nclimate1499
- [11] You, Y., Tomczak, M., 1993. Thermocline circulation and ventilation in the Indian Ocean derived from water mass analysis. *Deep Sea Research I* 40, 13e56.
- [12] Tomczak, Matthias & J Stuart Godfrey: Regional Oceanography: an Introduction 2nd edn. ISBN: 8170353068
- [13] Sengupta, D., Bharath Raj, G.N., Shenoi, S.S.C., 2006. Surface fresh water from Bay of Bengal runoff and Indonesian throughflow in the tropical Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33, L22609. doi:10.1029/2006GL027573.
- [14] Sardessai, S., Shetye, S., Maya, M.V., Mangala, K. R. and Kumar, S. P., 2010. Nutrient characteristics of the water masses and their seasonal variability in the eastern equatorial Indian Ocean, *Journal of Marine Environmental Research* volume 70: 272 -282.
- [15] Sharma, G.S., Gouveia, A.D., Sathendranath & Shubha, 1978. Incursion of the Pacific Ocean water into the Indian Ocean. *Proceedings of Indian Academy of Science (Earth and Planetary Sciences)*, Volume 87: 29 -45.
- [16] Girishkumar, M. S., M. Ravichandran, M. J. McPhaden and R. R. Rao, 2011. Intraseasonal variability in barrier layer thickness in the south central Bay of Bengal, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, C03009, doi:10.1029/2010JC006657
- [17] Shenoi, S. S. C., D. Shankar, and S. R. Shetye, 2004. Remote forcing annihilates barrier layer in southeastern Arabian Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05307, doi:10.1029/2003GL019270.
- [18] Lukas, R., and E. Lindstrom, 1991. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 96, suppl., 3343–3358
- [19] Bureau of technical supervision of the P.R of China. 1992. The Specification for Oceanographic Survey, Oceanographic Survey Data Processing (GB/T 12763.7—91). *Standards press of China*. P. 68-70.
- [20] Pond, S. & G. L. Pickard. 1983. Introductory dynamical oceanography. 2nd edition. *Pergamon Press*. Toronto
- [21] Papapostolou, Athanasia, 2017. Seasonal and Momentum Balance of the Atlantic Equatorial Undercurrent. *Open Access Dissertations*. 1866.