

Sirkulasi Termohalin Global: Tinjauan terhadap Penelitian Terkini dan Implikasinya

Engki A Kisnarti¹, Faizah Zasi Fidhini², Ima Nurmalia Permatasari³

^{1,2,3} Prodi Oseanografi, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah
Korespondensi: engki.andri@hangtuah.ac.id

Diterima: 28 November 2024; Direvisi: 5 April 2025; Disetujui: 16 April 2025

Abstrak

Sirkulasi termohalin global merupakan fenomena penting yang berpengaruh pada iklim dan transportasi energi di lautan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perbedaan salinitas dan temperatur terhadap dinamika arus laut. Metode yang digunakan mencakup model sirkulasi umum laut, analisis sedimen sapropel, dan penelitian difusi vertikal, dengan pengumpulan data dari berbagai sumber. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi kinetik angin menyuplai sekitar 778 GW, di mana 80% diubah menjadi energi potensial gravitasi, terutama di Samudra Antarktika. Selain itu, perubahan salinitas dan temperatur selama periode Messinian di Laut Mediterania menyebabkan deoksigenasi yang berdampak pada produktivitas primer. Temuan menunjukkan peningkatan salinitas di zona minimum serta anomali positif dalam salinitas dan temperatur antara kedalaman 600–1200 dbar. Penelitian ini menekankan pentingnya sirkulasi termohalin dalam pengaturan iklim global dan perlunya penelitian lebih lanjut untuk memahami dampak perubahan iklim terhadap sistem laut.

Kata kunci: Sirkulasi Termohalin, Arus Laut, Salinitas, Perubahan Iklim, Energi

Abstract

Global thermohaline circulation is a crucial phenomenon that impacts climate and energy transport in the oceans. This study aims to analyze the effects of salinity and temperature differences on the dynamics of ocean currents. The methods employed include general ocean circulation models, sapropel sediment analysis, and vertical diffusion studies, utilizing data from various sources. The results indicate that wind-generated kinetic energy supplies approximately 778 GW, with 80% converted into gravitational potential energy, primarily in the Antarctic Ocean. Additionally, changes in salinity and temperature during the Messinian period in the Mediterranean Sea resulted in deoxygenation, adversely affecting primary productivity. Findings show an increase in salinity in the minimum zone, along with positive anomalies in salinity and temperature between depths of 600–1200 dbar. This research underscores the importance of thermohaline circulation in global climate regulation and highlights the need for further studies to understand the impacts of climate change on marine systems.

Key words: Thermohaline circulation, Ocean currents, Salinity, Climate change, Energy

PENDAHULUAN

Sirkulasi termohalin berperan penting dalam pengangkutan panas di laut, memengaruhi iklim dan dikendalikan oleh perbedaan salinitas serta temperatur yang menggerakkan arus (Manabe dan Stouffer, 1994; Hasumi dan Sugimoto, 1999; Wang dkk., 1999; Hu dkk., 2004; Urakawa dan Hasumi, 2009). Interaksi atmosfer-laut seperti

pemanasan matahari, curah hujan, dan pencairan es memengaruhi pola arus, sedangkan pemanasan global menambah tantangan dalam menjaga keseimbangan energi sirkulasi akibat aliran air tawar dari es mencair yang dapat mengganggu stabilitas (Manabe dan Stouffer, 1994; Hu dkk., 2004).

Sirkulasi ini dipengaruhi oleh perubahan densitas air, di mana air hangat naik dan air dingin tenggelam; air asin yang lebih padat juga berperan dalam arus laut (Brennecke, 1921; Rohling dkk., 2015; Mancini dkk., 2023). Gelombang angin dan pasang surut mengubah energi potensial menjadi kinetik, memengaruhi arus laut dalam (Duffy dkk., 1999; Urakawa dan Hasumi, 2009). Deteksi perubahan sirkulasi masih sulit karena keterbatasan data dan variabilitas, terutama di Samudra Antarktika (Thorpe dkk., 2001; Latif dkk., 2006).

Mediterrania merupakan wilayah rentan terhadap pemanasan global yang berdampak pada sirkulasi dan oksigenasi laut dalam, dengan pengaruh yang dicatat sejak periode Langhian (Rohling dkk., 2015). Penelitian awal abad ke-20 oleh Sandstrom (1908) menyoroti pemisahan sumber panas, diikuti model sirkulasi umum yang kompleks untuk memahami hubungan temperatur, salinitas, dan arus (Kim, 2000; Wang dkk., 1999). Temuan lapisan sapropel menunjukkan gangguan sirkulasi masa lalu, didukung oleh data peningkatan temperatur dan dampak pendangkalan di paleo-Gibraltar (Roveri dkk., 2014; Mancini dkk., 2023). Model komputer penting untuk memprediksi perubahan sirkulasi dan dampaknya terhadap iklim global (Wang dkk., 1999).

METODE PENELITIAN

Sumber	Metode
Urakawa dan Hasumi, (2009)	- Model Sirkulasi Umum Laut di Laut Weddel dan Samudra Arktik - Menggunakan model <i>Ocean Component Model</i> (COCO) 4 untuk menghitung energi dari sirkulasi termohalin global, mencakup domain global termasuk Samudra Arktik dengan sistem koordinat orthogonal kurvilinear. - Resolusi horizontal model sekitar 300 km di lintang rendah dan 100 km di lintang tinggi, dan memiliki 20 lapisan vertikal dari 50 meter hingga 300 meter di kedalaman. - Data tekanan angin dari Röske dan penyesuaian temperatur serta salinitas menggunakan <i>World Ocean</i>

	<i>Atlas</i> 2001, dengan tambahan data salinitas di Laut Weddell untuk akurasi. • Model dijalankan selama 7000 tahun, dengan analisis pada 100 tahun terakhir. • Validasi model menggunakan <i>World Ocean Atlas</i> 2001 (WOA01) untuk memverifikasi reproduksi profil suhu, salinitas, dan gradien densitas.
Mancini dkk., (2024)	• Analisis sedimen sapropel pada masa messinian di Laut Mediterania • Pengumpulan 40 sampel yang diambil dari lapangan lapisan sapropel untuk dianalisis, termasuk petrografi pada 13 potongan tipis dan mikropaleontologi pada 36 potongan baru. • Isotop karbon ($\delta^{13}\text{C}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$) dianalisis pada 26 sampel, serta pengukuran total karbon organik pada 10 sampel. • Salinitas permukaan laut direkonstruksi menggunakan data isotop dan temperatur, dan dianalisis statistik untuk mengevaluasi hubungan antara variabel dan kondisi deposisi. • Pendekatan ini untuk mengetahui pengaruh perubahan iklim terhadap deoksigenasi dan dinamika sirkulasi termohalin di Mediterania.
Ozer dkk., (2019)	• Metode analisis data Sirkulasi termohalin di Laut Mediterania Timur • Data dikumpulkan dari 23 perjalanan penelitian oleh <i>Israel Oceanographic and Limnological Research</i> (IOLR) tahun 2012-2019, dengan fokus pada 14 perjalanan <i>Haifa Section</i> (HaiSec) di stasiun H04, H05, dan H06, yang terletak pada kedalaman lebih dari 1000 meter. • Pengukuran menggunakan CTD SBE911plus dengan SBE <i>Carousel</i> untuk mengumpulkan data tekanan, temperatur, salinitas, oksigen terlarut, dan <i>fluoresensi</i>. • Untuk menghitung difusi vertikal, diperlukan model difusi satu dimensi yang digunakan dengan koefisien difusi yang ditetapkan sebesar $3 \text{ cm}^2/\text{s}$, mengintegrasikan model dengan metode Euler implisit.

	• Pengamatan dilakukan secara biannual, dan profil yang dihasilkan digunakan untuk menghitung anomali salinitas dan suhu berdasarkan referensi dari profil tahun 2012. • Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan data yang diperoleh dengan model sederhana dan profil yang dihasilkan oleh metode dekomposisi anomali berdasarkan <i>Bindoff</i> dan <i>McDougall</i>.
--	--

Persamaan yang digunakan pada Urakawa dan Hasumi, (2009) untuk menghitung persamaan adveksi-divusi temperatur, energi potensial gravitasi, dan energi kinetik.

Persamaan untuk menggambarkan perubahan temperatur dengan adveksi arus dan difusi vertikal horizontal:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (uT) = \nabla \cdot (K_H \nabla T) + K_V \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- $\frac{\partial T}{\partial t}$: Perubahan suhu seiring waktu.
 $\nabla \cdot (uT)$: Adveksi temperatur oleh aliran kecepatan air
 $K_H \nabla T$: Difusi horizontal temperatur melalui perbedaan konsentrasi.
 $K_V \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$: Difusi vertikal temperatur

Persamaan yang digunakan untuk menyatakan perubahan energi gravitasi potensial dari pencampuran vertikal dan konveksi yaitu:

$$\frac{\partial(rF)}{\partial t} = \nabla \cdot (F_P^h) + F_W + F_G + F_V + F_H + F_C \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

- $\frac{\partial(rF)}{\partial t}$: Perubahan densitas energi potensial gravitasi seiring waktu.
 $\nabla \cdot (F_P^h)$: Aliran energi gravitasi potensial horizontal
 $\frac{\partial}{\partial z} F_P^y$: Aliran energi gravitasi potensial energi vertikal.
 $r'wgK_V \frac{\partial r}{\partial z}$: Kontribusi dari perubahan densitas akibat pengadukan vertikal.
 F_{CAB} : Kontribusi dari efek *cabbeling*.
 F_{CONV} : Kontribusi dari konveksi

Persamaan yang digunakan untuk menggambarkan perubahan kinetik, seperti dampak dari gaya angin dan dissipasi berikut:

$$\frac{\partial(r_a K)}{\partial t} = \nabla \cdot (v \nabla(r_a K)) + (sumber \text{ dan } sink) \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

- $\frac{\partial(r_a K)}{\partial t}$: Perubahan densitas energi kinetik seiring waktu.
 $\nabla \cdot (v \nabla(r_a K))$: Transportasi energi kinetik oleh aliran air.

$r'wg$: Konversi energi potensial ke energi kinetik akibat pergerakan vertikal.
 $r_e e$: Kehilangan energi kinetik akibat gesekan (viskositas).

Ozer dkk., (2024) menggunakan persamaan untuk menganalisis dan mengetahui proses termohalin di Laut Mediterania Timur.

Persamaan difusi satu dimensi yang digunakan untuk mengetahui proses perubahan salinitas dan temperatur menyebar pada kedalaman air yaitu:

$$\frac{\partial \theta S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta S}{\partial z^2} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

$\frac{\partial \theta S}{\partial t}$: laju perubahan dalam suhu potensial (θ) dan salinitas (S) terhadap waktu.
 D : Koefisien difusi.
 $\frac{\partial^2 \theta S}{\partial z^2}$: Perubahan suhu potensial dan salinitas terhadap kedalaman (z).

Persamaan berikut membedakan perubahan temperatur dan salinitas akibat variasi atmosfer serta proses pembentukan air, mengidentifikasi mekanisme perubahan termohalin dengan persamaan ini.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial p} \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

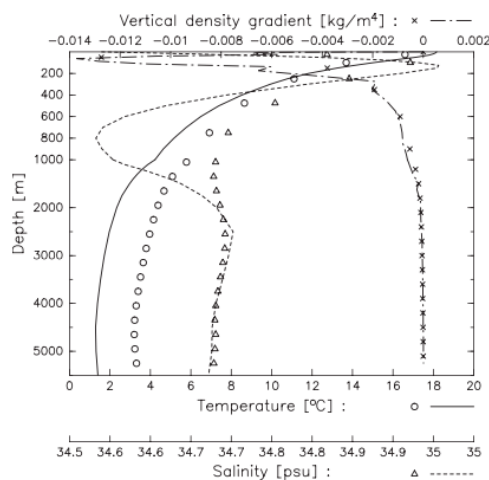
θ_t : Kontribusi *heaving* (pengangkatan) terhadap perubahan temperatur potensial.
 σ : Anomali densitas potensial (σ) yang menunjukkan perubahan kepadatan air.
 $\frac{\partial \theta}{\partial p}$: Menunjukkan gradien temperatur potensial terhadap tekanan (p)

HASIL DAN PEMBAHASAN

• Simulasi Model Sirkulasi Umum Laut

Hasil penelitian Urakawa dan Hasumi, (2009) mengungkapkan pentingnya sirkulasi termohalin global dalam memengaruhi iklim melalui analisis anggaran energi di tiga cekungan Samudra.

Grafik pada gambar 1 menunjukkan rata-rata secara global dari temperatur, salinitas, dan gradien vertikal densitas. Tanda tersebut menunjukkan hasil dari eksperimen model ini, sedangkan garis menunjukkan hasil dari *World Ocean Atlas* 2001 (WOA01). Temperatur pada model ini lebih tinggi dibandingkan WOA01, dan perbedaannya mencapai 2°C di laut dalam.

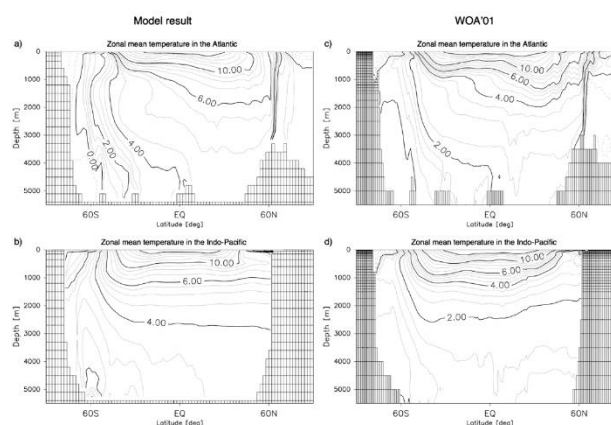


(Sumber: Urakawa dan Hasumi, 2009)

Gambar 1. Rata-rata Global Temperatur, Salinitas, dan Gradien Vertikal Densitas

Perbedaan antara temperatur dan salinitas, densitas di lapisan dasar laut konsisten dengan data klimatologi. Rata-rata zonal temperatur di Atlantik dan Indo-Pasifik pada gambar 2. Hasil dari penelitian ini di sebelah kiri, sementara hasil WOA01 ditunjukkan di sebelah kanan. Meskipun temperatur dalam model ini lebih tinggi dibandingkan dengan WOA01, pola distribusi serupa dengan klimatologi. Hal ini menunjukkan meskipun ada perbedaan dalam temperatur, struktur dasar dari massa air di laut dalam berhasil direproduksi dengan baik.

Estimasi energi global untuk kasus kontrol pada gambar 3. Komponen dalam anggaran energi diperlihatkan, termasuk energi kinetik yang dipasok oleh angin, energi gravitasi potensial yang dihasilkan dari pencampuran vertikal, dan kehilangan energi melalui konveksi dan efek *cabbeling*.



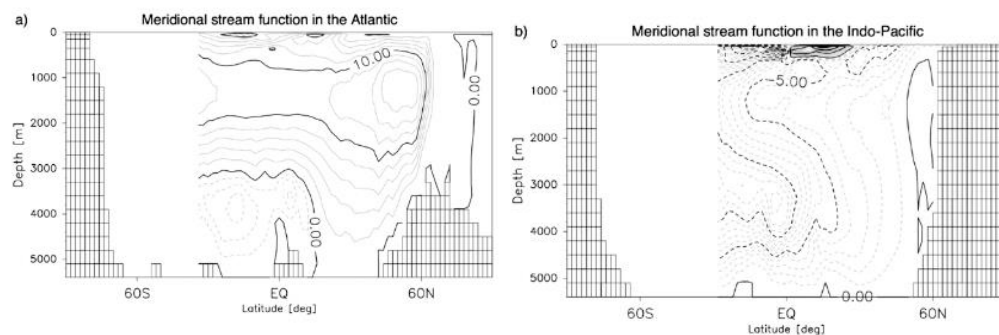
(Sumber: Urakawa dan Hasumi, 2009)

Gambar 2. Rata-rata Zona Temperatur di Atlantik dan Indo-Pasifik

Gambar 3 menggambarkan keseimbangan antara energi yang masuk dan keluar dalam sistem, dengan pengaruh angin sebagai komponen terbesar yang mencapai 778

GW. Total energi gravitasi potensial yang dihasilkan oleh pencampuran vertikal dan konversi energi juga memberikan gambaran bagaimana energi ditransfer dan diubah dalam sistem sirkulasi termohalin global.

Hasil penelitian Urakawa dan Hasumi, (2009) menunjukkan jika energi mekanik terbesar dalam sirkulasi termohalin global berasal dari energi kinetik yang dihasilkan angin, dengan sekitar 0,3 TW diubah menjadi energi potensial gravitasi, 80% di antaranya terjadi di Samudra Antarktika. Dalam kondisi dasar, input energi kinetik dari angin mencapai 778 GW, menghasilkan lebih dari 400 GW energi potensial gravitasi, sementara kehilangan akibat konveksi dan efek cabbeling masing-masing sebesar 202 GW dan 207 GW.

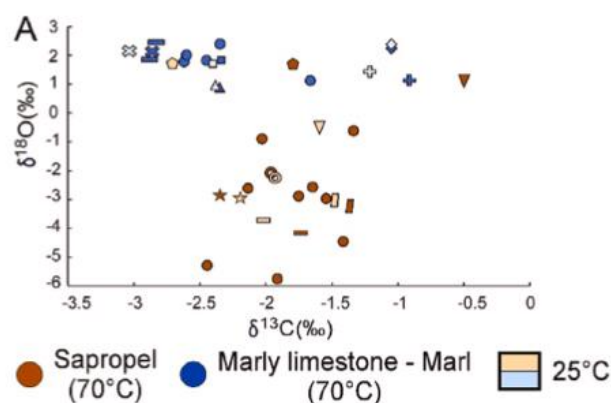


(Sumber: Urakawa dan Hasumi, 2009)

Gambar 3. Fungsi Aliran Meridional di Samudra Atlantik dan Indo-Pasifik

- **Kondisi Lingkungan pada Messinian di Laut Mediterania**

Penelitian Mancini dkk., (2024) menganalisis sensitivitas sirkulasi termohalin di Mediterania selama periode Messinian untuk memahami dinamika deoksigenasi dan faktor lingkungan yang memengaruhi deposisi sapropel di cekungan Adriatik.



(Sumber: Mancini dkk., 2024)

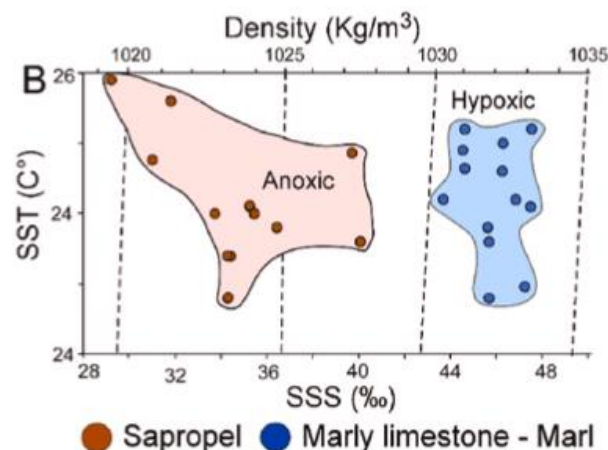
Gambar 4. Distribusi δ Isotop dan Litologi

Plot densitas pada gambar 4 yang dibangun kembali dari salinitas permukaan laut dan temperatur permukaan laut untuk berbagai litologi. Plot ini memberikan

gambaran tentang hubungan antara salinitas permukaan laut dan temperatur permukaan laut, menunjukkan bagaimana variasi dalam kedua parameter ini dapat memengaruhi kondisi lingkungan. Plot distribusi nilai isotop karbon ($\delta^{13}\text{C}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$) untuk berbagai litologi menunjukkan dampak perlakuan temperatur 25°C dan 70°C terhadap hasil. Setiap simbol yang sama menunjukkan sampel yang sama untuk perbandingan langsung. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi temperatur memengaruhi nilai isotop, mencerminkan perubahan komposisi mineral atau kondisi deposisi, dan memberikan wawasan tentang sensitivitas isotop terhadap lingkungan masa lalu.

Kerapatan plot mencerminkan distribusi data yang menunjukkan bahwa ada hubungan antara salinitas dan temperatur yang dapat memengaruhi sirkulasi laut dan kondisi produktivitas primer. Penelitian ini untuk mengetahui respons ekosistem terhadap perubahan iklim, serta bagaimana interaksi antara salinitas permukaan laut dan temperatur permukaan laut berkontribusi pada dinamika lingkungan.

Perbandingan nilai $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ pada gambar 6 yang diukur pada sedimen bulk dan yang disaring pada ukuran $45\ \mu\text{m}$. Setiap warna yang sama menunjukkan sampel yang sama, memungkinkan analisis perbandingan yang jelas. Data ini menunjukkan adanya perbedaan dalam nilai isotop antara sedimen bulk dan yang disaring, yang bisa mengindikasikan variasi dalam komposisi biota atau kondisi deposisi.

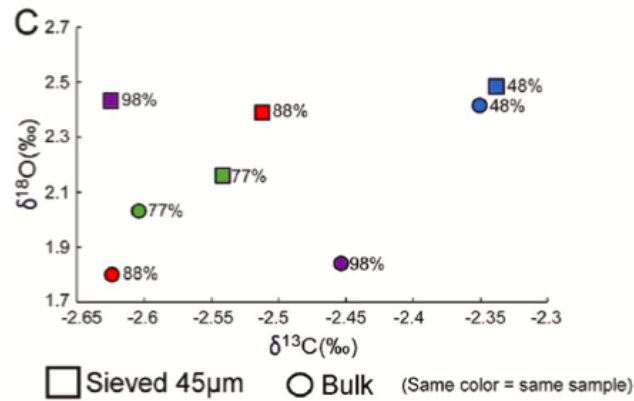


(Sumber: Mancini dkk., 2024)

Gambar 5. Plot Densitas, Salinitas Permukaan Laut dan Temperatur Permukaan Laut

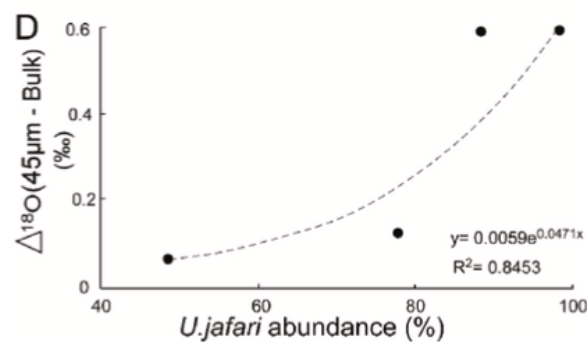
Hubungan eksponensial pada gambar 7 antara perbedaan nilai $\delta^{18}\text{O}$ pada ukuran $45\ \mu\text{m}$ dan sedimen bulk serta ketersediaan relatif spesies *Umbilicosphaera* jafari. Persamaan hubungan dan koefisien linear R^2 ditampilkan di sudut kanan bawah, menggambarkan kekuatan hubungan antara variabel. Hubungan eksponensial ini menunjukkan bahwa ketersediaan spesies ini berhubungan erat dengan variasi dalam komposisi isotop, mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan *U. jafari* juga memengaruhi nilai isotop.

Penelitian menunjukkan jika lapisan sapropel di Monte dei Corvi, Italia, selama periode Messinian terkait dengan peningkatan *buoyancy* permukaan laut yang menghambat sirkulasi termohalin.



(Sumber: Mancini dkk., 2024)

Gambar 6. Perbandingan Nilai δ Isotop



(Sumber: Mancini dkk., 2024)

Gambar 7. Hubungan Eksponensial antara δ Isotop dan Ketersediaan

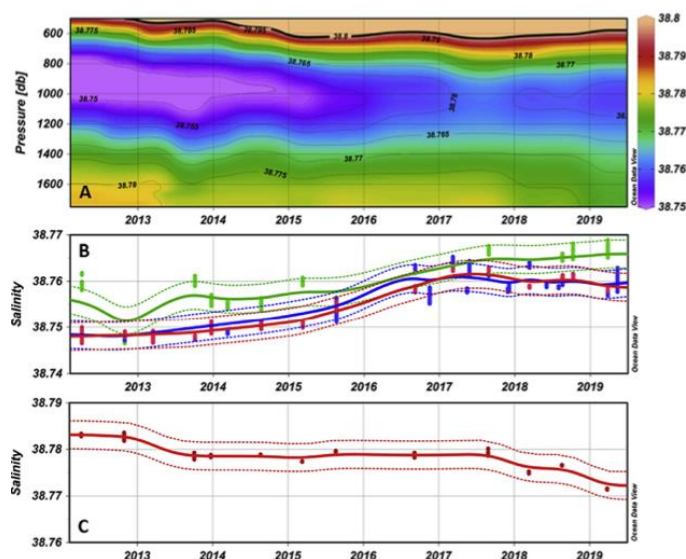
Analisis isotop karbon ($\delta^{13}\text{C}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$) mengungkapkan kondisi kekurangan oksigen yang menyebabkan penumpukan bahan organik. Variasi salinitas permukaan laut mengontrol deposisi sapropel dan mengurangi produktivitas primer. Perubahan litologis mencerminkan pemulihan sirkulasi termohalin dan produktivitas primer yang intens, yang berkontribusi pada kekurangan oksigen di dasar laut.

Profil salinitas dan temperatur pada gambar 10 menunjukkan peningkatan salinitas dan temperatur di rentang kedalaman 600-1200 dbar. Prediksi terhadap Sigma-Theta menunjukkan bahwa meskipun nilai di bagian bawah cenderung konstan, terjadi gradien temporal yang lebih kuat di bagian atas. Model difusi satu dimensi yang digunakan menegaskan bahwa perubahan ini sebagian besar disebabkan oleh proses difusi vertikal.

• Simulasi Difusi Model 1 Dimensi

Dalam penelitian Ozer, dkk (2019) menganalisis evolusi air dalam di Cekungan Laut Levantine Tenggara selama periode 2012 hingga 2019, berdasarkan data dari 23 ekspedisi. Perubahan salinitas pada gambar 8 di stasiun H06 dari tahun 2012 hingga 2019. Terlihat tren peningkatan salinitas yang signifikan pada zona minimum salinitas (~1000 dbar) selama periode 2012-2017, dengan laju sekitar 0.002 per tahun. Namun, stabilisasi salinitas terjadi sekitar nilai 38.76 setelah pertengahan 2017, menunjukkan kemungkinan perubahan dalam dinamika laut dalam.

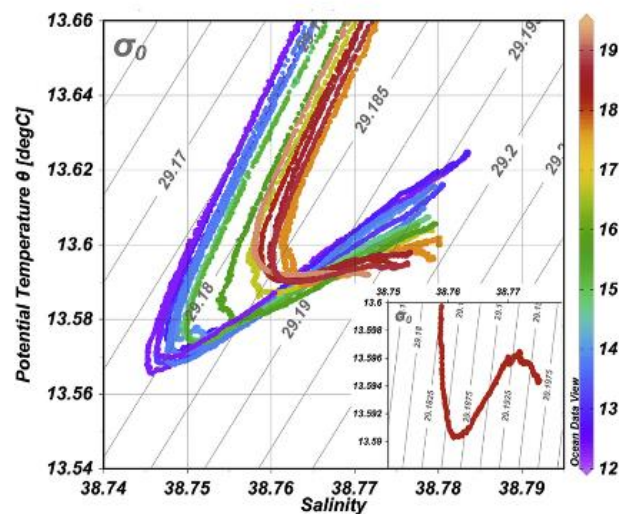
Diagram temperatur salinitas pada gambar 9 di stasiun H06 menunjukkan hubungan antara temperatur dan salinitas diberbagai tahun. Penurunan salinitas dan temperatur yang lebih rendah di dasar menunjukkan adanya air massa baru yang terbentuk, serta perbedaan karakteristik antara Massa Air Laut Mediterania Timur di Laut Aegea dan Massa Air Laut Mediterania Timur di Laut Adriatik. Diagram ini untuk mengetahui perubahan termohalin dari laut dalam.



(Sumber: Ozer dkk., 2019)

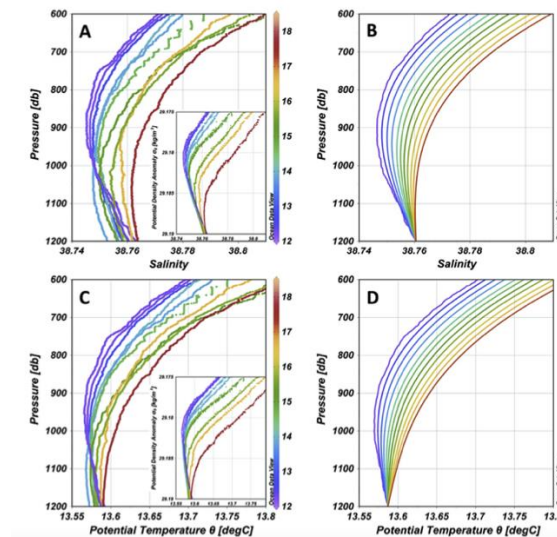
Gambar 8. Salinitas Air di Laut Mediterania Timur

Distribusi interpolasi menunjukkan nilai salinitas dan temperatur dekat dasar selama survei BSGas01. Ada perbedaan yang jelas antara lapisan air laut yang dipengaruhi angin di Samudra Atlantik dan lapisan air laut yang dipengaruhi angin di Samudra Antarktika, dengan Lapisan air laut yang dipengaruhi angin di Samudra Atlantik memiliki salinitas dan temperatur yang lebih tinggi. Distribusi ini mengikuti topografi dasar laut, menunjukkan hubungan antara geografi dan karakteristik air.



(Sumber: Ozer dkk., 2019)

Gambar 9. Diagram Temperatur Salinitas

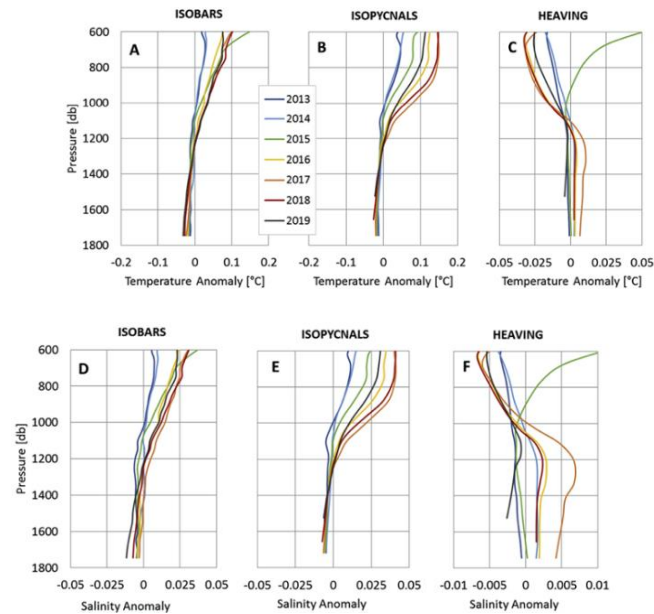


(Sumber: Ozer dkk., 2019)

Gambar 10. Profil Salinitas dan Temperatur

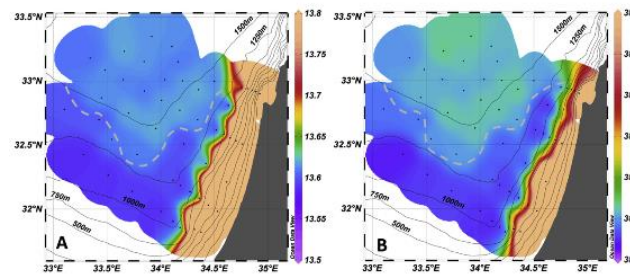
Anomali gambar 11 positif terlihat pada isobar dari 600 hingga 1200 dbar, menunjukkan tren peningkatan salinitas dan pemanasan. Anomali pada isopiknal menunjukkan tren positif yang semakin kuat dari tahun ke tahun, mencapai nilai maksimal pada 2017, sebelum mencapai kestabilan pada 2018-2019.

Perubahan kedalaman isohaline pada gambar 13 yaitu 38.8 dari tahun 2012 hingga 2018. Penurunan kedalaman isohaline lebih dari 100 dbar pada tahun 2017 dan 2018 menunjukkan perubahan besar dalam struktur termohalin. Variabilitas spasial selama periode tersebut juga menunjukkan pengaruh proses *mesoscale*.



(Sumber: Ozer dkk., 2019)

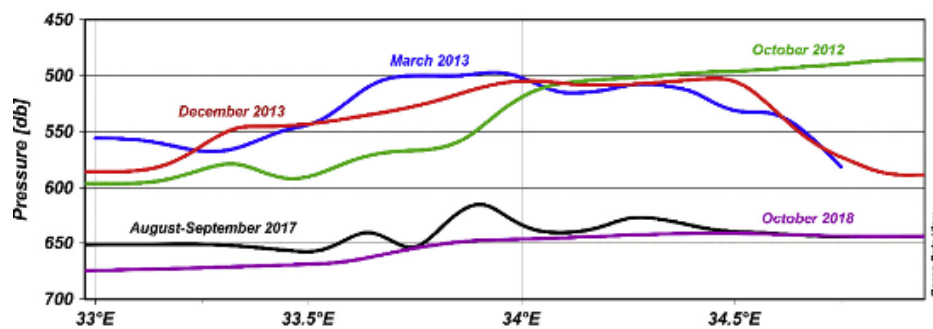
Gambar 11. Anomali Potensial Temperatur dan Salinitas



(Sumber: Ozer dkk., 2019)

Gambar 12. Distribusi Potensial Temperatur dan Salinitas

Analisis data dari stasiun H06 (2012–2019) menunjukkan peningkatan bertahap salinitas di zona minimum salinitas pada tekanan 1000 dbar, dengan laju 0,002 unit per tahun hingga 2017. Kenaikan ini disebabkan oleh difusi vertikal, namun sejak Agustus 2017, salinitas stabil pada 38,76, menandakan perubahan dinamika air dalam. Pengamatan juga menunjukkan pemanasan dan peningkatan salinitas pada isopiknal di tekanan 600–1200 dbar. Penelitian ini menyoroti perubahan dinamis massa air di Laut Mediterania Timur dan dampaknya pada sirkulasi Atlantik Utara serta iklim global, serta perlu pemantauan berkelanjutan untuk memahami dampaknya terhadap perubahan iklim.



(Sumber: Ozer dkk., 2019)

Gambar 13. Kedalaman Isohalin

Pada ketiga penelitian memiliki kelebihan dan kekurangan, yaitu penelitian Urakawa dan Hasumi, (2009) unggul dalam penggunaan model sirkulasi umum laut yang realistis. Model ini memungkinkan analisis mendalam tentang dinamika energi di tiga basin utama dan menekankan peran dominan Samudra Antarktika dalam keseimbangan energi termohalin global. Namun, penelitian ini memiliki kekurangan, seperti potensi ketidakakuratan pada parameter difusi, ketergantungan pada data terbatas untuk estimasi energi, dan kemungkinan melebihi konveksi di beberapa wilayah. Penelitian Mancini dkk. (2024) menonjol dengan pendekatan multidisiplin yang memberikan gambaran komprehensif tentang kondisi lingkungan pada periode Messinian. Kekurangannya adalah pelestarian fosil yang buruk pada beberapa sampel dan ketergantungan pada model yang bisa menghasilkan ketidakakuratan dalam konteks geologis yang lebih luas. Sementara itu, penelitian Ozer dkk., (2019) memberikan wawasan jangka panjang dengan data dari 23 ekspedisi. Mereka menggunakan model difusi dan dekomposisi anomali untuk memahami variasi termohalin, namun dibatasi oleh frekuensi pengukuran yang hanya dilakukan dua kali setahun dan ketergantungan pada model yang tidak sepenuhnya mencerminkan kompleksitas ekosistem yang di laut.

KESIMPULAN

Sirkulasi termohalin merupakan mekanisme utama dalam transportasi panas dan nutrisi di lautan, memainkan peran penting dalam sistem iklim global. Penelitian menunjukkan bahwa energi kinetik angin menyuplai sekitar 778 GW energi, dengan 80% diubah menjadi energi potensial gravitasi di Samudra Antarktika. Kehilangan energi akibat konveksi mencapai 202 GW, sementara efek *cabbeling* menyumbang 207 GW. Di Mediterania Timur, analisis isotop karbon ($\delta^{13}\text{C}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$) dari sedimen sapropel mengungkapkan deoksigenasi selama periode Messinian akibat perubahan salinitas dan temperatur, yang menghambat sirkulasi termohalin dan memengaruhi

produktivitas primer. Penelitian di Laut Mediterania Timur, salinitas di zona minimum (~1000 dbar) meningkat secara bertahap sebesar 0,002 per tahun hingga mencapai kestabilan pada nilai 38,76 pada tahun 2017. Selain itu, anomali salinitas dan temperatur antara 600–1200 dbar menunjukkan tren positif yang semakin kuat hingga 2017 sebelum stabil pada 2018–2019, mencerminkan adanya perubahan dalam dinamika massa air. Meskipun pendekatan model difusi satu dimensi di Laut Mediterania dianggap praktis, frekuensi pengamatan yang terbatas dan kompleksitas ekosistem yang tidak sepenuhnya terwakili menjadi tantangan

REFERENSI

- Brennecke, W. (1921). *Die ozeanographischen Arbeiten der deutschen antarktischen Expedition 1911-1912*. Hammerich and Lesser.
- Duffy, P. B., & Caldeira, K. (1999). Sensitivity of simulated salinity in a three-dimensional ocean model to upper ocean transport of salt from sea-ice formation. *Geophysical Research Letters*, 24(11), 1323-1326.
- Hu, A., Meehl, G. A., & Han, W. (2004). Detecting thermohaline circulation changes from ocean properties in a coupled model. *Geophysical Research Letters*, 31(13).
- Kim, S. J., & Stössel, A. (2000). Impact of subgrid-scale convection on global thermohaline properties and circulation. *Journal of physical oceanography*, 31(3), 656-674.
- Latif, M., Böning, C., Willebrand, J., Biastoch, A., Dengg, J., Keenlyside, N., ... & Madec, G. (2006). Is the thermohaline circulation changing?. *Journal of Climate*, 19(18), 4631-4637.
- Manabe, S., & Stouffer, R. J. (1994). Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. *Journal of climate*, 7(1), 5-23.
- Mancini, A. M., Bocci, G., Morigi, C., Gennari, R., Lozar, F., & Negri, A. (2023). Past analogues of deoxygenation events in the mediterranean sea: a tool to constrain future impacts. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 562.
- Mancini, A. M., Gennari, R., Lozar, F., Natalicchio, M., Della Porta, G., Bernasconi, D., ... & Negri, A. (2024). Sensitivity of the thermohaline circulation during the Messinian: Toward constraining the dynamics of Mediterranean deoxygenation. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 203, 104217.
- Ozer, T., Gertman, I., Gildor, H., Goldman, R., & Herut, B. (2019). Evidence for recent thermohaline variability and processes in the deep water of the Southeastern Levantine Basin, Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 171, 104651.
- Roveri, M., Flecker, R., Krijgsman, W., Lofi, J., Lugli, S., Manzi, V., ... & Stoica, M. (2014). The Messinian Salinity Crisis: Past and future of a great challenge for marine sciences. *Marine Geology*, 352, 25-58.
- Rohling, E. J., Marino, G., & Grant, K. M. (2015). Mediterranean climate and oceanography, and the periodic development of anoxic events (sapropels). *Earth-Science Reviews*, 143, 62-97.

- Thorpe, R. B., Gregory, J. M., Johns, T. C., Wood, R. A., & Mitchell, J. F. B. (2001). Mechanisms determining the Atlantic thermohaline circulation response to greenhouse gas forcing in a non-flux-adjusted coupled climate model. *Journal of Climate*, 14(14), 3102-3116.
- Urakawa, L. S., & Hasumi, H. (2009). A remote effect of geothermal heat on the global thermohaline circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C7).
- Urakawa, L. S., & Hasumi, H. (2009). The energetics of global thermohalin circulation and its wind enhancement. *Journal of physical oceanography*, 39(7), 1715-1728.
- Wang, X., Stone, P. H., & Marotzke, J. (1999). Global thermohaline circulation. Part II: Sensitivity with interactive atmospheric transports. *Journal of climate*, 12(1), 83-91.
- Wang, X., Stone, P. H., & Marotzke, J. (1999). Global thermohaline circulation. Part II: Sensitivity with interactive atmospheric transports. *Journal of climate*, 12(1), 83-91.