

I.

PENDAHULUAN

Laut merupakan tempat terjadinya interaksi lintas bidang keilmuan, seperti kimia, fisika, biologi, dan geologi sehingga untuk mempelajari oseanografi dengan baik maka kita juga harus memahami proses-proses lain yang saling terikat satu sama lain. Buku ini membahas bidang-bidang ilmu terkait tadi secara sederhana agar mudah diikuti, dalam rangka memperkenalkan ilmu oseanografi secara menyeluruh. Penekanan lebih lanjut dari buku ini adalah ke bidang oseanografi kimia atau kimia kelautan, yang mempelajari sifat-sifat kimia air laut beserta proses-proses kimia yang terjadi di dalamnya. Hampir seluruh unsur kimia yang ada pada tabel periodik juga ada (terlarut) di dalam air laut, dengan konsentrasi yang bervariasi mulai dari yang paling banyak, yaitu pada tingkatan persen (%) seperti unsur Natrium, karena mudah larut dan ionnya stabil di dalam air laut, permil (‰), ppm, ppb sampai dengan ppt (yang jumlahnya paling sedikit, seperti unsur-unsur radioaktif). Interaksi berbagai unsur kimia di laut ini juga terjadi dengan berbagai lingkungan lainnya seperti biosfer, atmosfer, dan geosfer. Oleh karena itu, ilmu ini berkaitan erat dengan bidang ilmu lainnya seperti fisika laut, biologi laut, dan geologi laut.

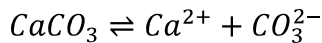
Unsur kimia di alam mengalami siklus yang melibatkan berbagai makhluk hidup maupun benda mati, seperti tumbuhan, hewan, sedimen, magma, gunung berapi, dan sebagainya. Unsur

kimia di dalam air laut sebagian besar berasal dari daratan yang masuk ke laut melalui aliran air sungai, air hujan/partikel debu, air tanah, dan aktivitas gunung api di dalam laut. Unsur-unsur kimia yang bermanfaat bagi makhluk hidup seperti Fe, Mn, dan Mo akan diserap oleh fitoplankton yang hidup di permukaan laut (0–500 m). Fitoplankton ini bertindak sebagai produsen pertama dalam rantai makanan karena bisa menangkap karbon anorganik yang kemudian diikat dan diubah menjadi karbon organik. Karbon anorganik sederhana dalam bentuk karbon dioksida pertama kali masuk ke permukaan laut dari atmosfer melalui berbagai proses fisika seperti difusi dan karena adanya arus serta ombak di permukaan laut. Selanjutnya, fitoplankton ini sebagian besar akan dimakan oleh zooplankton, kemudian zooplankton akan dimakan oleh ikan kecil, ikan kecil dimakan ikan besar, dan seterusnya. Makhluk hidup yang mati di laut akan jatuh dan mengendap ke dasar laut karena gaya gravitasi sehingga bergabung membentuk sedimen, yang kemudian mengalami subduksi ke dalam perut bumi, lalu dibawa ke permukaan bumi melalui aktivitas gunung berapi dan pada akhirnya masuk kembali ke dalam laut. Proses ini terjadi terus-menerus membentuk siklus zat kimia yang berulang dalam skala waktu geologi yang sangat lama.

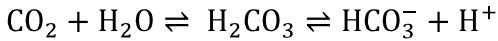
Oceanografi kimia mempelajari komposisi zat kimia yang ada di dalam air laut, dinamika zat kimia di laut, interaksi antara makhluk hidup dengan unsur kimia, pengaruh berbagai zat kimia pada lingkungan laut, mempelajari mengapa air laut berasa asin, dan sebagainya. Ilmu ini juga bermanfaat untuk mempelajari sejarah pembentukan bumi dan bagaimana kondisi bumi di masa lalu melalui ilmu paleo-oceanografi yang memanfaatkan pengetahuan isotop berbagai unsur kimia yang ada di laut. Beberapa unsur kimia yang terlarut bisa digunakan juga sebagai perunut pergerakan air laut global yang membawa energi panas (kehangatan) dari lautan tropis ke wilayah nontropis sehingga manusia yang hidup di negara Eropa, misalnya, masih bisa merasakan musim dingin yang tidak terlalu ekstrem karena pergerakan arus air laut global ini.

Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan para ahli oseanografi kimia di berbagai negara menyebutkan bahwa penambahan unsur Fe ke dalam air laut bisa menurunkan secara signifikan kadar karbon dioksida di atmosfer penyebab pemanasan global. Penambahan Fe ini akan menghasilkan pertumbuhan fitoplankton yang banyak atau *blooming* sehingga akhirnya akan menyedot karbon dioksida di atmosfer dan menyimpannya ke dasar laut. Meskipun demikian, beberapa ahli lainnya masih menyangsikan keamanan 'hipotesis unsur besi' ini karena bisa berakibat buruk bagi biota laut lainnya, seperti rusaknya terumbu karang yang disebut dengan pemutihan terumbu karang, dan sebagainya sehingga masih diperlukan penelitian lebih lanjut tentang hal ini jika ingin diterapkan dalam skala besar.

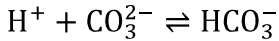
Pengaruh meningkatnya konsentrasi gas karbon dioksida atau CO₂ di udara terhadap kerusakan terumbu karang akan dibahas lebih detail dalam buku ini. Proses kimia pembentukan dan perusakan terumbu karang (karena kalsium karbonat sebagai penyusun utama terumbu karang larut menjadi ion-ionnya) secara sederhana dapat dituliskan sebagai berikut:



Penggunaan bahan bakar fosil yang dimulai sejak era industrialisasi (sekitar 1940-an) dengan ditemukannya mesin diesel dan bahan bakar fosil untuk pertama kalinya di Amerika Serikat membuat konsentrasi gas rumah kaca seperti CO₂ di atmosfer meningkat drastis jumlahnya, jauh melebihi yang pernah ada di dalam atmosfer bumi alami selama ini. Lebih dari 25% gas CO₂ yang dihasilkan oleh kegiatan industri dan transportasi tersebut akan masuk ke dalam air laut melalui berbagai mekanisme, seperti proses difusi. Gas CO₂ tersebut akan bereaksi dengan air laut membentuk asam karbonat (H₂CO₃) yang kemudian terurai menjadi ion bikarbonat (HCO₃⁻) dan proton (H⁺), dan pada akhirnya menyebabkan pH air laut juga turun.



yang kemudian merusak terumbu karang, karena ion H^+ yang bersifat asam ini akan melarutkan kalsium karbonat penyusun utama terumbu karang dengan reaksi sebagai berikut:



1.1. Sejarah Perkembangan Oseanografi

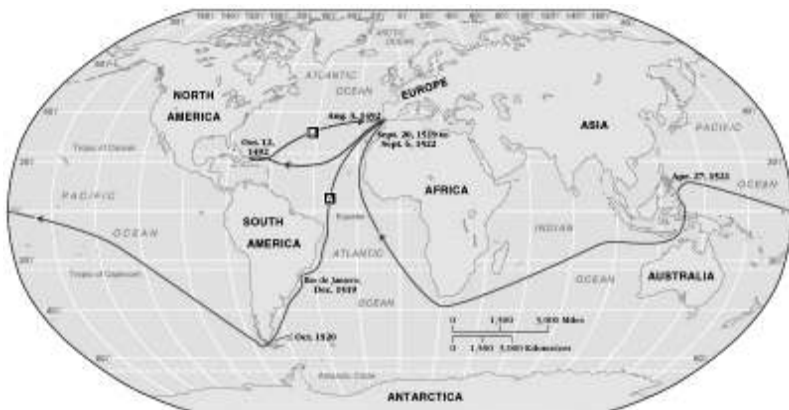
Laut telah menjadi sumber kehidupan bagi manusia sejak zaman dahulu kala karena ikan yang ada di lautan menjadi salah satu sumber makanan bagi nelayan. Sejarah mencatat bahwa posisi bintang di langit digunakan sebagai alat navigasi untuk mengarungi lautan pada masa sebelum ditemukannya kompas, GPS, dan alat navigasi modern. Antara 1.000 sampai dengan 3.000 tahun Sebelum Masehi, penduduk dari daratan Benua Asia (khususnya dari Semenanjung Malay dan Taiwan) mulai bermigrasi ke Kepulauan Polinesia yang berada di tengah-tengah Samudra Pasifik. Mereka bisa berhasil dan selamat berlabuh di berbagai pulau kecil yang sangat jauh dari tempat asal mereka dikarenakan kemampuan navigasi yang mumpuni serta teknik survival di lautan yang mereka kuasai. Para pelaut pendahulu ini kemudian meneruskan pelayaran dan migrasinya sampai ke Kepulauan Hawaii di utara dan Negara New Zealand di selatan Polinesia sehingga penduduk asli Hawaii, Polinesia, dan New Zealand saat ini memiliki anatomi bentuk tubuh yang mirip karena mereka memang berasal dari nenek moyang yang sama.

Pada masa setelah masehi, pelaut dari negara-negara Eropa, Timur Tengah, China, dan Amerika tercatat sebagai perintis yang melakukan pelayaran mengelilingi dunia beberapa ratus tahun yang lalu. Gambar 1 menunjukkan dua rute perjalanan perintis menggunakan kapal penelitian bidang oseanografi pada waktu yang berbeda, yang dimulai dan berakhir di Eropa dan dipimpin oleh Kapten Columbus pada 1492 (garis B) dan perjalanan yang

dipimpin Kapten Magellan pada 1519-1521 (garis A). Ekspedisi Magellan ini merupakan pelayaran pertama yang mengelilingi dunia. Dari 260 orang penumpang yang ikut dari awal ekspedisi Magellan, hanya 18 orang saja yang tetap hidup sampai ekspedisi berakhir (total lama ekspedisi 3 tahun). Kebanyakan mereka terbunuh oleh penduduk asli di kepulauan sekitar Filipina.

1.2. Oseanografi di Zaman Modern

Ekspedisi ilmiah yang tercatat dengan baik pada zaman modern dimulai dari ekspedisi Kapten James Cook (Inggris) yang melakukan tiga kali pelayaran pada tahun yang berbeda-beda, pada kurun waktu 1768-1779. Setelah itu diikuti oleh ekspedisi kapal riset Beagle (1831) dan Challenger (1872-1876) dari Amerika dengan salah satu penelitiannya adalah Charles Darwin. Pada awal perkembangan oseanografi ini, para peneliti melakukan penentuan salinitas air laut, menganalisis kadar oksigen, dan nutrisi seperti nitrat, fosfat, dan silikat di dalam air laut.



Gambar 1. Dua buah rute perjalanan perintis dalam bidang oseanografi.

Perkembangan yang paling pesat dimulai pada 1925 sampai dengan 1940. Sedangkan, penelitian untuk bidang *trace elements* atau unsur renik yang konsentrasinya sangat kecil (ppb atau bagian per miliar) seperti unsur Fe, Cd, Cu, Zn, dan lain-lain dengan hasil yang memuaskan dimulai pada saat ditemukannya alat spektroskopi seperti ICP-MS sekitar 1980. Saat ini penelitian di bidang logam renik sedang giat dilakukan oleh para ahli oseanografi di dunia, khususnya peneliti dari negara-negara maju yang tergabung dalam proyek penelitian GEOTRACES. Di Indonesia sendiri, penelitian bidang oseanografi dilakukan oleh beberapa institusi seperti LIPI yang memiliki fasilitas kapal riset Baruna Jaya. Penelitian yang sudah biasa dilaksanakan adalah di bidang oseanografi fisika, biologi, dan geologi. Penelitian di bidang oseanografi kimia, terutama untuk unsur-unsur renik seperti logam berat, memerlukan peralatan yang lebih canggih sehingga belum banyak dilakukan di Indonesia.

II.

ILMU YANG BERHUBUNGAN DENGAN OSEANOGRAFI

2.1. Sistem Tata Surya

Untuk memahami laut dengan lebih baik dan komprehensif maka kita perlu mengetahui awal mula pembentukan laut itu sendiri, yang akan kita bahas dengan lebih detail pada bab ini. Pembahasan dimulai dari sistem tata surya (*solar system*) tempat planet Bumi berada. Tata surya terdiri dari matahari dan delapan planet yang mengitarinya (selain Pluto), termasuk bumi sebagai planet ketiga terdekat dari matahari. Tata surya kita berada di salah satu tangan-bagian-luar galaksi Bimasakti (atau *Milkyway galaxy*), yang memiliki sekitar 200 miliar bintang. Bintang-bintang ini bersinar seperti matahari yang setiap siang hari kita lihat menyinari bumi karena matahari juga termasuk salah satu bintang di galaksi Bimasakti. Dari berbagai teori yang dikemukakan oleh para ahli astronomi, meskipun masih menjadi perdebatan, pendapat yang paling banyak diakui menyatakan bahwa usia tata surya di mana kita berada (planet Bumi, planet lain, dan matahari) adalah 4,6 miliar tahun, sedangkan galaksi Bimasakti sendiri telah berusia 13,2 miliar tahun. Kemunculan galaksi Bimasakti ini mendekati kemunculan alam semesta yang berusia 13,7 miliar tahun, dihitung berdasarkan teori *Big Bang* atau ledakan dahsyat.

Big Bang merupakan awal mula terjadinya ekspansi atau mengembangnya alam semesta yang pada saat itu semua benda di alam semesta ini terkumpul dalam satu titik kecil yang memiliki kerapatan dan panas tak terhingga besarnya, yang disebut dengan singularitas. Pada saat terjadinya *Big Bang*, alam semesta mengembang dengan sangat cepat sambil memancarkan radiasi yang sangat dahsyat, hanya dalam hitungan detik saja, sampai kerapatannya berkurang dan panasnya menjadi normal seperti saat ini. Tiga menit setelah terjadinya *Big Bang*, inti dari unsur-unsur ringan seperti Hidrogen dan Helium mulai terbentuk (disebut dengan istilah *nucleosynthesis*), meskipun atom yang stabil masih belum bisa terbentuk karena kerapatan dan suhu alam semesta yang masih sangat tinggi sehingga menyulitkan elektron bergabung dengan inti untuk membentuk atom. Beberapa menit setelah *Big Bang*, suhu alam semesta terus turun sampai menjadi 1 miliar derajat Celcius, tetapi suhu ini masih terlalu tinggi untuk menggabungkan elektron dengan inti untuk membentuk atom, jadi unsur kimia masih dalam bentuk plasma. Setelah 56.000 tahun dari awal mula *Big Bang*, suhu alam semesta turun menjadi 8.726 derajat Celcius, dan setelah 324.000 tahun barulah suhunya cukup untuk membuat elektron bisa bergabung dengan inti untuk membentuk atom untuk pertama kalinya.

Seratus juta tahun setelah *Big Bang*, alam semesta semakin mengembang dan suhunya juga semakin mendingin, benda-benda langit mulai membentuk kluster karena adanya gravitasi yang akhirnya kluster ini membentuk bintang. Bintang-bintang ini kemudian menghasilkan dan menyemburkan unsur kimia yang lebih berat dari Helium sampai dengan unsur Besi, yang prosesnya disebut dengan *stellar nucleosynthesis*. Sekumpulan bintang ini lalu membentuk galaksi, dan sebagian kecil bintang tersebut bersinar sangat terang yang kemudian meledak (*supernova*) sehingga mengeluarkan berbagai materi ke berbagai arah alam semesta. Ledakan *supernova* inilah yang menghasilkan unsur kimia dengan nomor atom yang lebih berat seperti Uranium dkk., prosesnya sendiri disebut dengan *supernova nucleosynthesis*. Unsur-unsur

kimia ini terbentuk karena proses penggabungan (fusi), yang awalnya dari unsur ringan hidrogen dan helium. Sampai saat ini, unsur utama penyusun bintang adalah unsur ringan hidrogen dan helium tersebut.

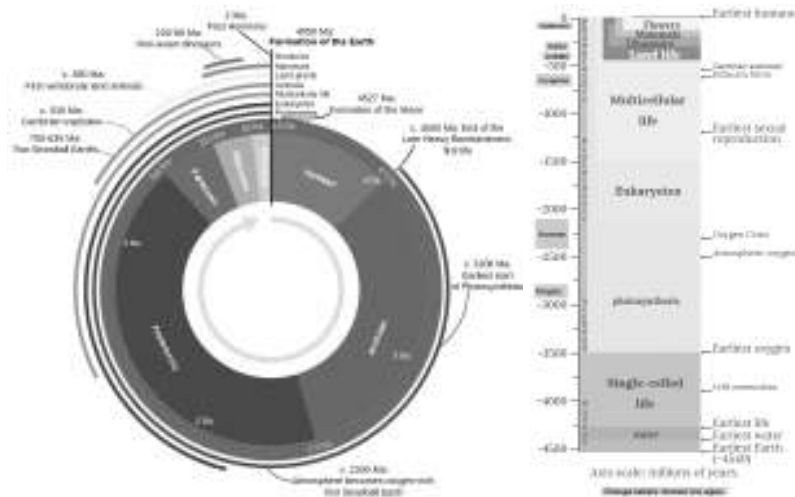
2.2. Bumi dan Kehidupan di Dalamnya

Seperti telah disinggung pada bab sebelumnya, para saintis berkesimpulan bahwa bumi terbentuk sekitar 4,6 miliar tahun lalu oleh karena adanya tabrakan dahsyat di galaksi Bimasakti yang berbentuk pipih seperti disk/cakram dan berisi kumpulan awan berbagai material, yang juga membentuk matahari pada waktu yang bersamaan. Gaya gravitasi menarik kumpulan gas dan debu kosmik ini menjadi kumpulan-kumpulan kecil yang akhirnya menjadi asteroid dan cikal bakal planet. Bumi sendiri pada awal mulanya berbentuk bola api yang pada akhirnya mendingin dan bisa ditempati makhluk hidup seperti sekarang, setelah miliaran tahun berlalu.

Dalam rentang waktu geologi (rentang waktu yang sangat lama, berskala jutaan tahun), pembentukan bumi serta makhluk hidup (hewan dan tumbuhan) di dalamnya dirangkum pada Gambar 2. Peneliti membagi rentang zaman tersebut menjadi Hadean, Archean, Proterozoic, Paleozoic, Mesozoic, dan Cenozoic. Hadean merupakan zaman paling tua yang dimulai dari 4,6 Ga sampai dengan 4,0 Ga tahun yang lalu (Ga singkatan dari Giga atau 10^9 alias miliar, dengan satuan tahun maka 4,6 Ga sama dengan 4,6 miliar tahun).

Karena pada awal mulanya bumi merupakan bola api maka air belum terbentuk. Pada zaman Hadean ini, atmosfer bumi berisi gas-gas beracun seperti CO_2 , H_2S , CO , dan lain-lain. Sama seperti gas-gas yang dikeluarkan oleh gunung berapi saat ini sehingga belum ada oksigen yang sangat penting untuk makhluk hidup. Gunung api yang sekarang masih aktif adalah peninggalan Bumi zaman dulu yang berbentuk bola api dan gunung api di mana-

mana. Semakin lama nanti maka jumlah gunung api aktif pun semakin berkurang karena bumi semakin dingin dan stabil.



Gambar 2. Pembentukan bumi berdasarkan waktu geologi (kiri) dan sejarah munculnya makhluk hidup di bumi (kanan).

Seperti disinggung pada bab sebelumnya, air mulai ada di bumi setelah ratusan juta tahun bumi tadi terbentuk (masih di zaman Hadean). Kehidupan pertama muncul dari dalam air yang terbentuk ini karena daratan masih sangat panas, gersang, dan beracun. Memasuki periode atau zaman Archean, makhluk hidup pertama bersel tunggal, yaitu bakteri mulai hidup. Bakteri merupakan makhluk yang sangat kuat karena bisa hidup di lingkungan ekstrem dan beracun seperti di masa-masa awal pembentukan bumi ini. Setelah bumi semakin dingin maka bermunculanlah makhluk hidup lain di dalam air, seperti fitoplankton yang bisa bersifat autotrof karena bisa menghasilkan makanan sendiri dengan cara melakukan fotosintesis, yaitu fiksasi atau mengambil karbon dari udara sebagai sumber energinya. Fotosintesis fitoplankton ini kemudian akan menghasilkan gas oksigen yang akan mengisi udara/atmosfer di atas air/lautan