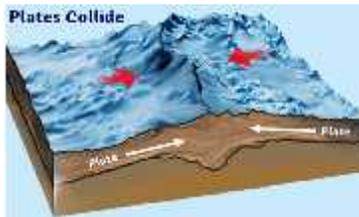


BAB III

Pergerakan Tektonik Lempeng

3.1 Pendahuluan



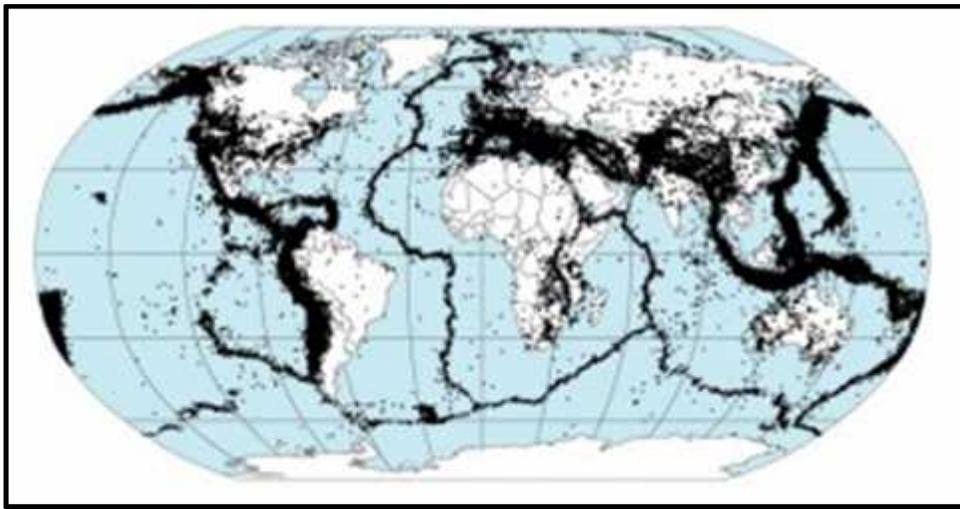
Gambar 3.1. Pergerakan lempeng yang saling bertumbukan.

Bagian terluar bumi memiliki suhu yang rendah (lebih dingin) dibandingkan bagian yang di dalam bumi. Secara mekanik lapisan kulit terluar disebut litosfer (*Lithosphere*). Ketebalan litosfer ini mencapai 100 km dan terdiri dari kulit luar (*crust*) atau yang biasa disebut kerak bumi dalam istilah bahasa Indonesia dan selubung paling atas (*Uppermost Mantel*). Litosfer ini menipis di bagian Lautan/Samudra dan lebih tebal pada bagian Benua. Astenosfer (*Asthenosphere*) berada di bawah litosfer. Karena tekanan dan suhu yang tinggi pada zona Astenosfer, ini menyebabkan viskositas (*viscosity*) nya relatif rendah sehingga memungkinkan untuk mengalir. Jika bumi adalah di tinjau dari keilmuan mekanika, secara mekanika litosfer mengapung diatas astenosfer. Jika bumi ditinjau secara mesin yang panas, litosfer adalah kulit bagian terluar, dimana panas dialirkan dengan konduksi dan astenosfer adalah sel sel bagian dalam dimana panas dialirkan melalui proses konveksi dan menghasilkan pergerakan lempeng yang mungkin bertabrakan satu sama lainnya (Gambar 3.1)

Pada konsep lempeng tektonik, litosfer dibagi kedalam beberapa bagian kecil yang terdiri dari lempeng yang kaku, dimana lempeng lempeng kecil ini bergerak diatas astenosfer. Hampir semua deformasi (perubahan) adalah dihasilkan oleh pergerakan lempeng lempeng ini, seperti meregangkan (*stretching*), melipat (*folding*) ataupun menggeser (*shearing*) yang mengambil tempat di pinggiran batas lempeng. Sedangkan zona yang berada di dalam lempeng itu sendiri deformasi yang dialaminya tidak begitu signifikan.



Peta seismisiti (*seismicity map*) ataupun disebut juga peta aktivitas gempa bumi memperlihatkan adanya aktivitas gempa pada batas-batas lempeng tektonik ini (Gambar 3.2). Terlihat bahwa hampir semua aktivitas gunung api terdapat pada zona batas lempeng tektonik. Pada Bab 3 ini akan dibahas bagaimana teori tektonik lempeng, batas-batas lempeng dan bagaimana lempeng lempeng tersebut bisa bergerak.



Gambar 3.2. Lokasi batas lempeng dan juga sekaligus lokasi gempa bumi sejak tahun 1963-1998. Sudah tercatat sebanyak 358,214 kejadian gempa bumi selama 35 tahun tersebut.

3.2 Arus Konveksi pada Mantel

Arus konveksi dalam mantel merupakan proses fisika biasa. Konveksi adalah perpindahan panas yang disertai dengan perpindahan materialnya. Ini sangat terlihat sekali pada proses memanaskan air, yang mana air yang panas akan naik ke atas dan air yang berada di atas akan bergerak kebawah (Gambar 3.3). Konveksi mantel adalah gerakan merayap perlahan dari mantel silikat padat Bumi yang disebabkan oleh arus konveksi yang membawa panas dari bagian dalam bumi ke permukaan.



Bahan litosfer permukaan bumi, yang naik di atas astenosfer (dua komponen mantel atas), dibagi menjadi sejumlah pelat yang terus-menerus dibuat dan dikonsumsi di batas lempeng yang berlawanan. Akresi terjadi saat mantel ditambahkan ke batas lempeng yang tumbuh, yang terkait dengan dasar laut yang menyebar. Bahan tambahan panas ini didinginkan dengan konduksi dan konveksi panas. Bahan subduksi ini meresap ke dalam interior bumi. Beberapa material subduksi tampaknya mencapai mantel bawah, sementara di wilayah lain, bahan ini tenggelam lebih jauh.

Konveksi mantel tampaknya telah jauh lebih aktif selama periode Hadean, menghasilkan pemilahan gravitasi besi cair yang lebih berat, dan unsur nikel dan sulfida di inti, dan mineral silikat yang lebih ringan di dalam mantel.

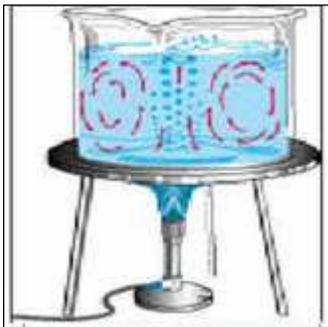
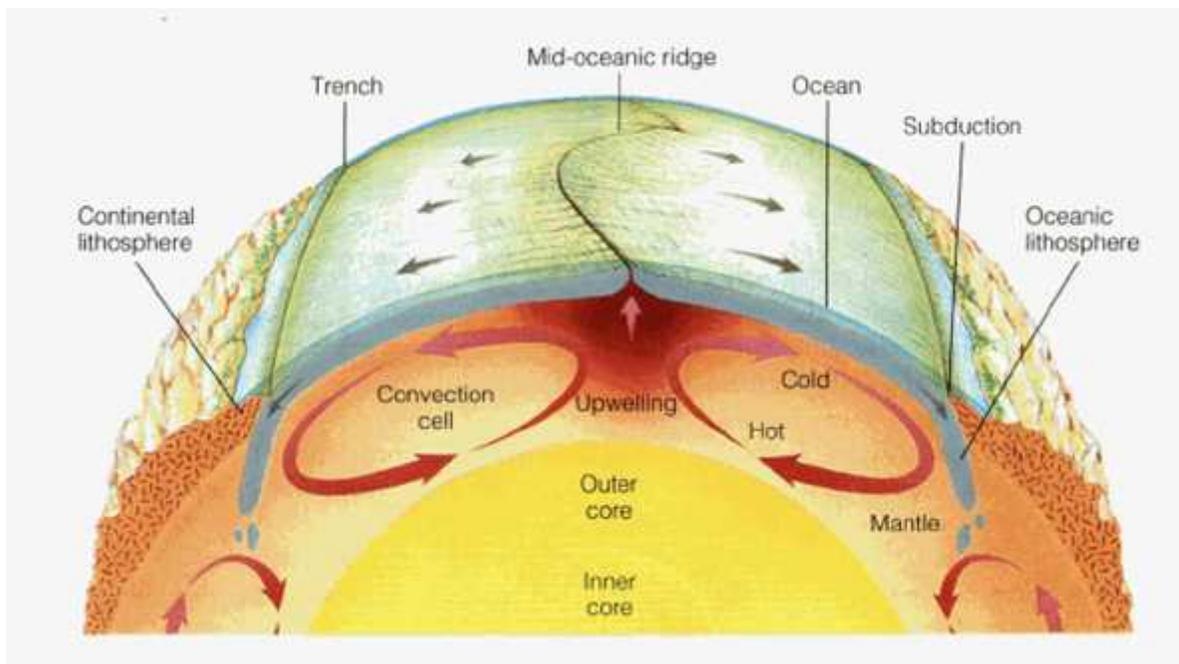
Selama akhir abad 20, terjadi perdebatan yang signifikan dalam komunitas ahli geofisika mengenai arus konveksi. Meskipun unsur-unsur perdebatan ini masih berlanjut, hasil dari tomografi seismik, simulasi numerik konveksi mantel dan pemeriksaan medan gravitasi bumi semuanya mulai menunjukkan eksistensi konveksi mantel keseluruhan, setidaknya pada saat ini sudah sangat jelas. Dalam model ini, litosfer samudra menurun sepanjang jalan dari permukaan ke batas inti-mantel dan arus panas naik dari batas ini sampai ke permukaan. Gambar 3.3 ini sangat didasarkan pada hasil model tomografi seismik global, yang biasanya menunjukkan anomali lempengan dan mirip gepeng yang melintasi zona transisi mantel.

Meskipun sekarang diterima dengan baik bahwa lempengan subduksi melintasi zona transisi mantel dan turun ke mantel bawah, debat tentang keberadaan dan kontinuitas arus naik ini tetap ada, yang mana arus naik ini adalah implikasi penting untuk gaya konveksi mantel. Perdebatan ini terkait dengan kontroversi mengenai apakah vulkanisme intraplate disebabkan oleh proses oleh arus panas dari mantel bawah. Banyak studi

Pergerakan Tektonik Lempeng

geokimia berpendapat bahwa lava yang meletus di daerah intraplate beda komposisi.

Kecepatan konveksi mantel adalah 20 mm/tahun di dekat kerak tapi bisa sedikit berbeda di kedalaman tertentu. Konveksi skala kecil di mantel atas jauh lebih cepat daripada konveksi di dekat inti. Siklus konveksi dangkal tunggal berlangsung 50 tahun, meskipun konveksi yang lebih dalam bisa mendekati 200 juta tahun.



Gambar 3.3. Arus konveksi pada mantel. Arus konveksi ini merupakan proses perpindahan panas yang diikuti dengan perpindahan material seperti pada pemanasan air.

3.3 Teori Tektonik Lempeng



Teori tektonik lempeng menjelaskan tentang interaksi dari lempeng lempeng dan akibat akibat dari interaksi ini, yang kesemua ini adalah berdasarkan beberapa asumsi:

1. Pembentukan material lempeng yang baru terjadi pada zona pemekaran lantai samudra (*seafloor spreading*). Material litosfer samudra yang baru dihasilkan sepanjang palung laut (*midocean ridge*) yang masih aktif.
2. Material litosfer yang baru, ketika terbentuk akan menjadi bagian dari lempeng yang kaku ini.
3. Luas area permukaan bumi tetap konstan, jadi pemekaran lantai samudra harus diseimbangkan dengan penghilangan lempeng yang lainnya
4. Lempeng litosfer mampu mentransmisikan tekanan sampai pada jarak horizontal yang cukup besar tanpa adanya penyambung.

Ada tiga jenis batas lempeng tektonik.

1. Batas Divergen. Sepanjang batas divergen (*Divergent boundary*), juga disebut zona penambahan ataupun pembuatan lempeng, lempeng bergerak saling menjauh satu sama lainnya. Pada batas lempeng ini, materi lempeng yang baru yang mengisi kekosongan pergerakan menjauh itu diperoleh dari mantel yang ditambahkan ke litosfer. Batas divergen lempeng ini direpresentasikan dengan system punggung tengah samudra (*midocean ridge system*) sepanjang sumbu didaerah material lempeng baru dihasilkan (Gambar 3.4)

Batas divergen dimulai dengan memisahkan bagian terpisah dari kerak benua di sepanjang lembah rift. Lautan sempit mewakili batas-batas divergen muda dan lautan yang luas adalah indikasi lembah laut yang telah lama terbentuk. Pegunungan laut dan zona subduksi adalah batas antara lempeng litosfer. Kekosongan dibuat saat litosfer samudra memisahkan diri sepanjang punggung samudra. Kekosongan



itu diisi oleh magma yang naik dari astenosfer. Magma mendingin dan mengeras untuk menciptakan litosfer samudera baru.

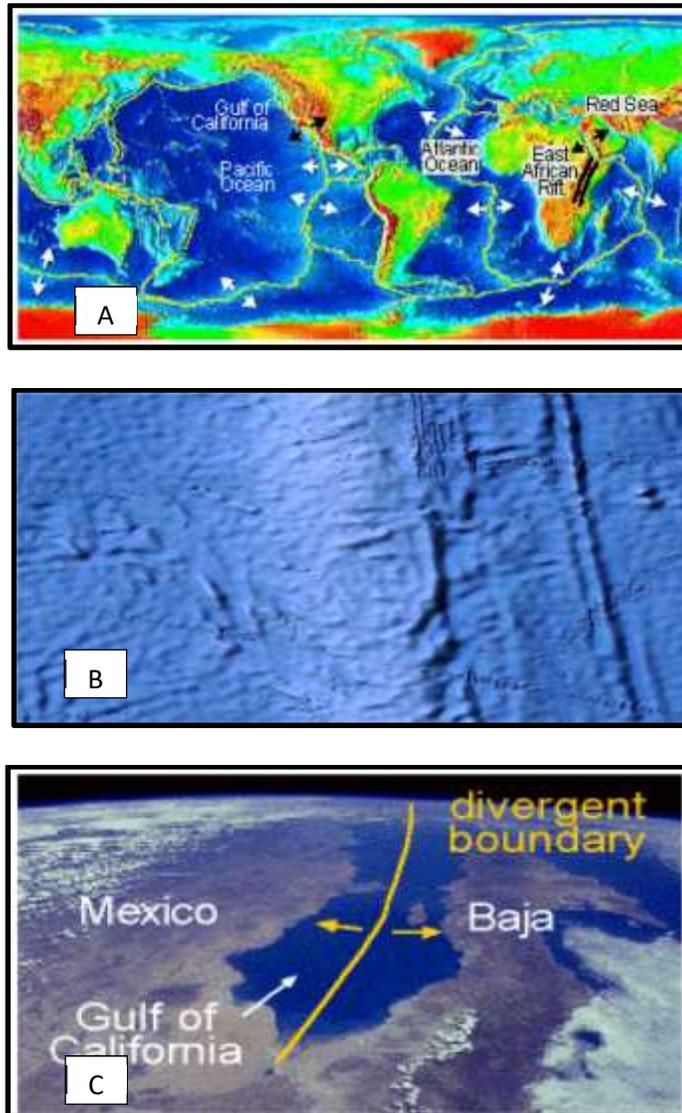
Evolusi batas lempeng divergen memiliki tiga tahap yang dapat dikenali. Kelahiran batas divergen mengharuskan lempeng yang ada mulai membelah. Peristiwa seperti ini yang bahkan masih terjadi hari ini dapat dilihat di Afrika Timur, di daerah yang dikenal sebagai zona Rift Afrika Timur. Benua Afrika perlahan membelah dua. Saat kerak benua membelah, magma dari astenosfer memenuhi celah. Beberapa gunung berapi hadir di zona rift. Akhirnya celah tersebut akan membentuk lautan sempit seperti Laut Merah di sebelah utara zona Rift Afrika Timur. Laut Merah memisahkan Arab Saudi dari Afrika. Laut sempit yang serupa juga terjadi di Teluk California, terletak di antara Meksiko dan Baja California (Gambar 3.4C). Diperlukan jutaan tahun untuk membentuk rantai samudra yang matang, karena kecepatan gerakan lempeng sangat lambat (10-100 mm / tahun). Kerak samudera tertua di Samudera Atlantik dan Pasifik adalah usia yang sama (~ 180 Juta tahun) namun Pasifik jauh lebih luas daripada Atlantik karena penyebarannya 2 sampai 3 kali lebih cepat.

2. **Batas Konvergen.** Sepanjang batas konvergen (*Convergent*), juga disebut zona pengkonsumsian atau zona penghancuran, lempeng relative saling mendekat. Kebanyakan zona ini diwakili oleh zona dalam /parit (*trench*), juga system kepulauan dari zona subduksi yang mana pada zona subduksi ini, salahsatu lempeng masuk menghunjam kedalam mantel dan mengalami penghancuran (peleburan) akibat suhu yang tinggi. Lempeng yang menghunjam ini biasanya mencapai kedalaman 700 km. Contoh wilayah zona konvergen ini adalah sepanjang pantai barat pulau Sumatera (Gambar 3.5a), pantai selatan pulau Jawa, tenggara Jepang, Aleutians dan bererapa tempat lainnya. Batas konvergen memiliki tiga



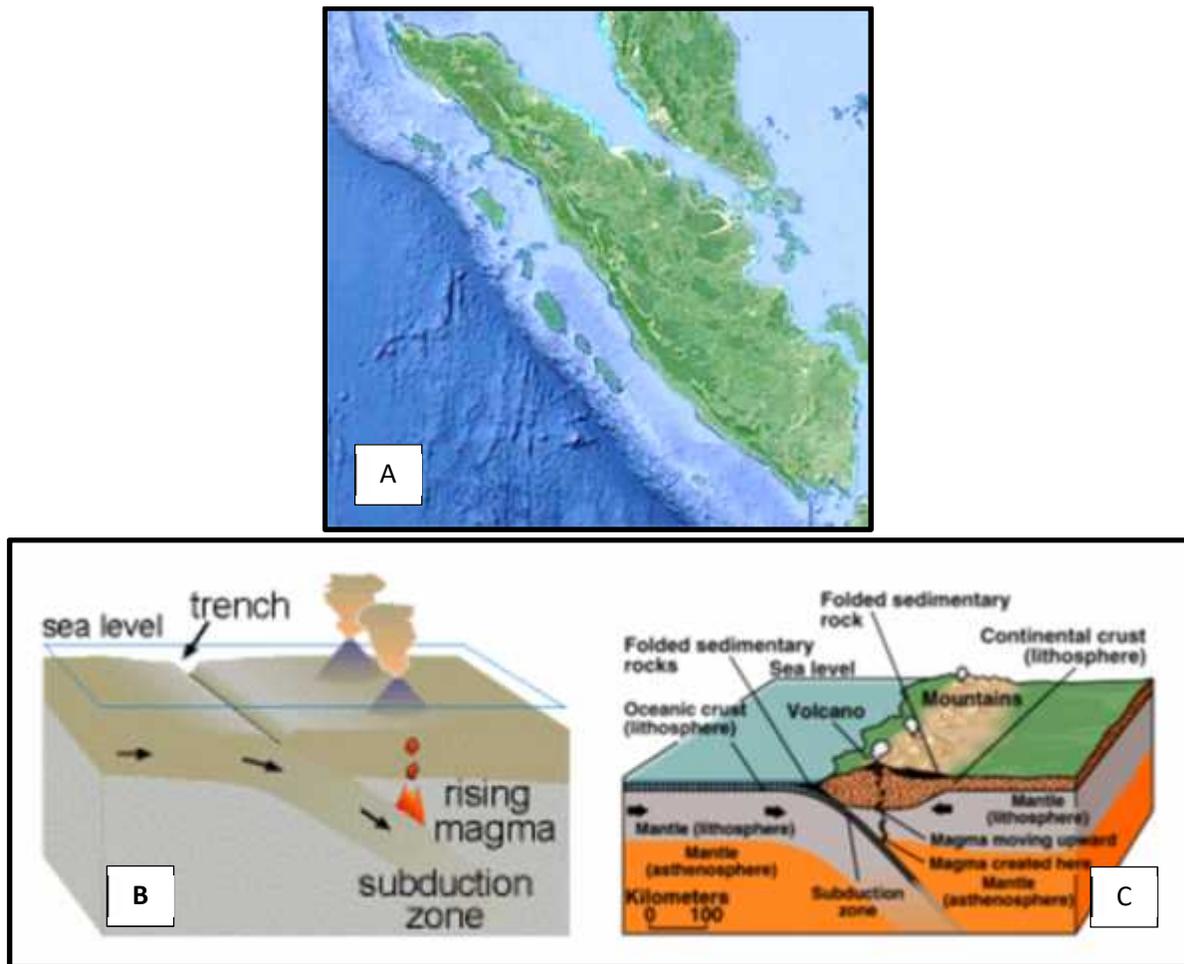
Pergerakan Tektonik Lempeng

variasi tergantung pada jenis litosfer yang disandingkan di zona subduksi.



Gambar 3.4. (a). Lempeng tektonik yang utama serta lokasi punggung laut, (b). Punggung laut dilihat dari foto Satelit (sumber: Google Earth). (c) Foto dari NASA sepanjang Teluk California antara semenanjung Baja dan daratan Meksiko. Teluk mewakili punggung laut muda. Pemekaran rantai laut mendorong Baja menjauh dari daratan.

Pergerakan Tektonik Lempeng



Gambar 3.5. (a) Batas konvergen sepanjang pantai Sumatera dari Google Earth. (b) Batas lempeng samudera vs konvergensi lantai samudera. (c) Batas lempeng samudera vs konvergensi lantai Benua.

Lempeng samudera dan lempeng samudera.

Lempeng yang lebih tua turun ke zona subduksi saat lempeng litosfer samudera bertabrakan di sepanjang parit (Gambar 3.5b). Lempeng yang turun membawa sedimen berisi air dari dasar laut menghunjam ke dalam mantel. Kehadiran air merubah sifat fisika dan kimia magma. Magma naik melalui lempeng samudra, ketika mencapai permukaan akan membentuk gunung api. Saat gunung berapi tumbuh,



mungkin bisa lebih tinggi dari permukaan laut dan membentuk sebuah pulau.

Parit laut sering berbatasan dengan rantai pulau (busur pulau) yang dibentuk oleh magma dari subduksi lempeng. Kepulauan Aleutian di ujung Alaska dibentuk oleh magma yang dihasilkan saat lempeng Pasifik turun di bawah litosfer samudra di tepi lempeng Amerika Utara. Aktivitas vulkanik saat ini di pulau Montserrat di Karibia adalah hasil dari subduksi Pelat Amerika Selatan di bawah busur pulau yang menandai tepi lempeng Karibia.

Lempeng samudra dan lempeng benua.

Ketika litosfer samudra bertabrakan dengan litosfer benua, lempeng samudra akan turun ke zona subduksi (Gambar 3.5c). Litosfer samudra lebih padat daripada litosfer benua dan karena itu dikonsumsi secara istimewa. Litosfer benua hampir tidak pernah hancur di zona subduksi.

Daerah Nazca di bawah Amerika Selatan di zona subduksi yang terletak di sepanjang batas barat benua itu. Konvergensi antara lempeng ini telah menghasilkan pembentukan Pegunungan Andes (pegunungan tertinggi kedua di Bumi), vulkanisme luas, dan aktivitas gempa yang meluas. Gempa bumi terbesar terkonsentrasi di sepanjang zona subduksi.

Lempeng benua dan lempeng benua.

Pegunungan tertinggi didunia terbentuk (dan terus tumbuh) adalah akibat tabrakan benua. Pegunungan Himalaya merupakan batas antara lempeng India dan Eurasia. Tabrakan lempeng dimulai lebih dari 40 juta tahun yang lalu ketika India menabrak benua Asia. Litosfer benua relatif ringan dan mengalami deformasi berdekatan dengan zona subduksi daripada dikonsumsi.



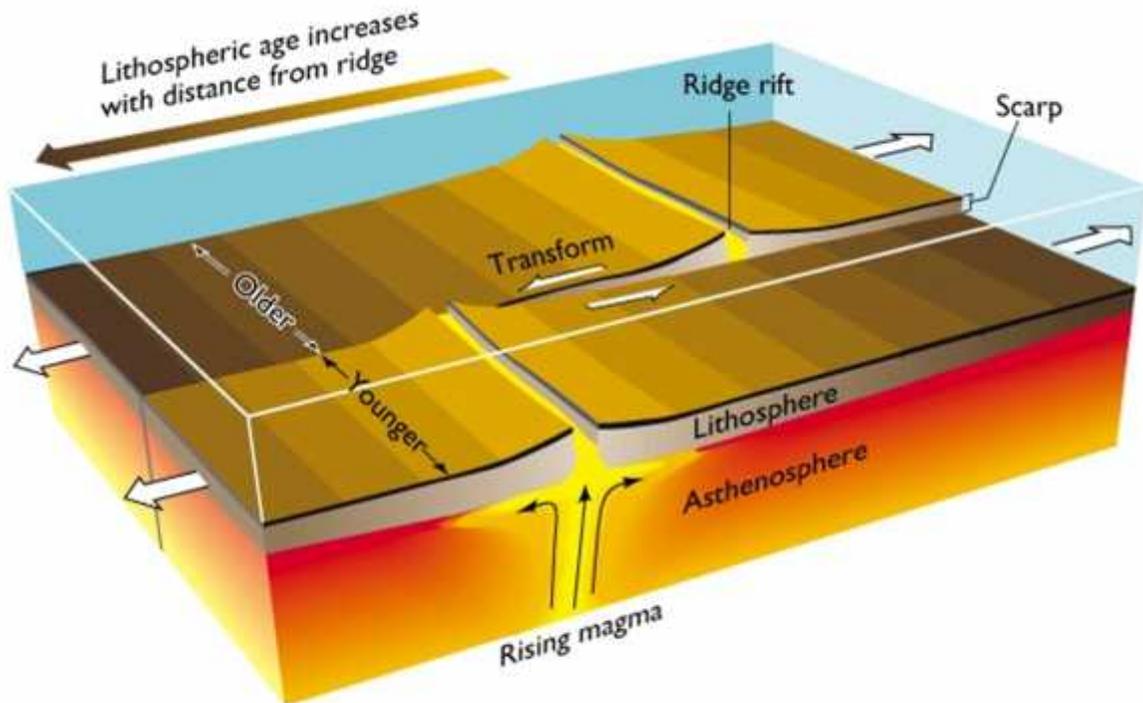
3. Batas Konservatif. Batas ini disebut juga dengan batas geser (*Shear Boundary*) atau batas transform (*Transform Boundary*). Pada batas konservatif (*Conservative Boundary*) ini tidak ada litosfer baru yang dihasilkan ataupun tidak ada litosfer yang dihancurkan. Lempeng lempeng bergerak secara lateral (relative mendatar) satu sama lainnya (Gambar 3.6). Batas-batas lempeng seperti ini direpresentasikan dengan adanya patahan transform (transform fault). Sejauh ini, jenis patahan transform yang paling banyak dijumpai adalah patahan punggung laut (*ridge-ridge fault*) yang bisa mencapai panjang ratusan kilometer. Patahan ini yang paling dikenal adalah bisa dijumpai di Lautan Pacific, Atlantic dan lautan di belahan selatan. Pergerakan transform ini bisa mencapai kelajuan sekitar 15 cm pertahun. Contoh lain adalah patahan San Andreas, California, adalah batas transformasi yang memisahkan lempeng Amerika Utara dan Pasifik.

Batas transform ini seperti mur dan baut yang memegang struktur masif bersama-sama. Litosfer baru tidak diciptakan pada batas transformasi, litosfer litosfer lama juga tidak hancur. Akibatnya, itu sebabnya batas-batas ini disebut juga batas lempeng konservatif. Lempeng meluncur ibarat melewati tetangga mereka seperti lalu lintas di jalan dua arah, bergerak berlawanan arah berlawanan.

Batas transform bergabung dengan bagian batas konvergen dan / atau divergen. Sebagian besar batas transform terjadi di dasar laut dimana mereka mengimbangi pegunungan samudra. Pelat di kedua sisi selang transformasi melintasi satu sama lain tanpa ada lempeng yang dikonsumsi dan tanpa celah pembuka di antara lempeng. Analisis terbaru data satelit altimeter telah memungkinkan para ilmuwan untuk menggunakan sedikit variasi dalam elevasi permukaan laut untuk menentukan topografi dasar laut. Penelitian samudra menunjukkan adanya batas

Pergerakan Tektonik Lempeng

transformasi di sepanjang Ride Pasifik Timur atau Mid-Atlantic.



Gambar 3.6. Batas transform memperlihatkan adanya pergerakan dua lempeng yang saling bergerak menjauh.

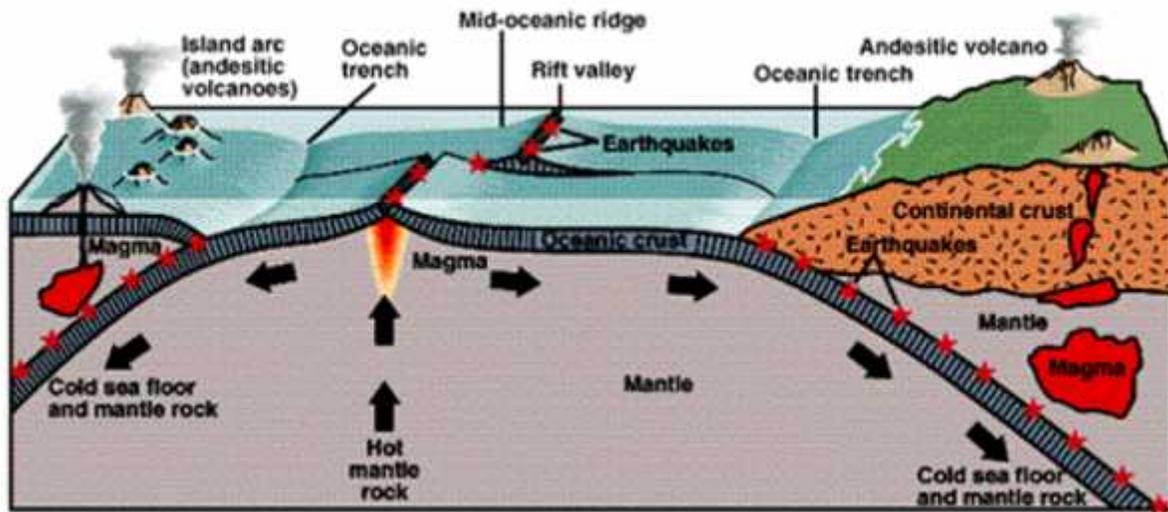
Walaupun lempeng benua (*Continental plate*) dan lempeng samudera (*Oceanic plate*) ini dibuat dari material yang berbeda, biasanya hanya bagian dari lempeng samudera yang dibentuk dan ataupun yang di hancurkan. Jelas sekali pemekaran lantai samudra pada daerah punggung laut menghasilkan hanya material litosfer lempeng samudera, namun sangat susah untuk dijelaskan (walaupun beberapa logika dapat menjelaskannya) mengapa lempeng benua biasanya tidak mengalami penghancuran pada batas konvergen. Pada zona zona subduksi (*subduction zone*) dimana pada zona ini (Gambar 3.7), lempeng samudera dan lempeng benua bertemu dan lempeng samudera menghunjam (*subducted*) ke bawah lempeng benua dan masuk



Pergerakan Tektonik Lempeng

dalam zona mantel yang akhirnya lempeng samudra ini akan dilelehkan / dihancurkan oleh mantel akibat suhu yang tinggi.

Hipotesis pemekaran lantai samudra mengarah pada kesimpulan bahwa dasar laut baru diciptakan di pegunungan samudera. Lithosfer samudra berangsur-angsur menjauh dari punggung dan menciptakan celah untuk mengisi dengan material baru yang naik dari bawah. Hipotesis tersebut menyiratkan bahwa cekungan laut akan meningkat dalam ukuran kecil kecuali mekanisme tambahan dapat ditemukan untuk mengkompensasi terciptanya litosfer samudra baru. Mekanisme itu adalah penghancuran litosfer samudra tua di sepanjang parit laut. Ketika konsep pemekaran lantai samudra disesuaikan dengan gagasan pergerakan lempeng oleh Wegener sebelumnya, maka lahirlah teori baru yaitu lempeng tektonik.



Gambar 3.7. Litosfer muda terbentuk di sistem punggung laut dan dileburkan di parit (zona subduksi). Magma naik ke permukaan di pegunungan samudera, meningkatkan aliran panas. Gempa dangkal terletak di pegunungan dan parit namun gempa bumi dalam hanya terjadi di zona subduksi.



3.4. Pergerakan Lempeng

Pangaea atau Pangea adalah supercontinent yang ada selama era Paleozoik dan awal Mesozoik (Gambar 3.8). Ini dikumpulkan dari unit benua sebelumnya sekitar 335 juta tahun yang lalu, dan mulai berpisah pisah sekitar 175 juta tahun yang lalu. Berbeda dengan Bumi sekarang dan distribusi kontinentalnya, sebagian besar Pangaea berada di belahan bumi selatan dan dikelilingi oleh superocean, Panthalassa. Pangaea adalah supercontinent terbaru yang telah ada dan yang pertama direkonstruksi oleh ahli geologi.



Gambar 3.8. Peta Pangaea yang disesuaikan dengan benua benua sekarang

Nama "Pangea / Pangea" berasal dari panci Yunani Kuno ($\pi\alpha\tilde{\nu}$, "all, whole, whole") dan Gaia ($\Gamma\alpha\tilde{\iota}$, "Mother Earth, land"). Konsep bahwa benua tersebut pernah membentuk benua yang besar terus menerus pertama kali diusulkan oleh Alfred Wegener, pencetus teori ilmiah drift kontinental, dalam publikasi tahun 1912, *The Origin of Continents* (*Die Entstehung der Kontinente*). Dia memperluas hipotesisnya dalam bukunya yang berjudul *The Origin of Continents and Oceans* (*Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*), di mana dia mendalilkan bahwa, sebelum Pangea terputus putus dan hanyut ke lokasi mereka sekarang, semua benua telah membentuk satu benua super yang dia disebut "Urkontinent".

Nama "Pangea" terjadi pada edisi 1920 *Die Entstehung der Kontinente dan Ozeane*, namun hanya sekali, ketika Wegener mengacu pada supercontinent kuno sebagai "the Pangea of the Carboniferous". Wegener menggunakan bentuk Jerman "Pangäa", namun namanya masuk dalam literatur ilmiah Jerman dan Inggris (masing-masing pada 1922 dan 1926) dalam bentuk Latin "Pangaea" (dari bahasa Yunani "Pangaia"), terutama karena sebuah simposium dari American Association of Petroleum Geologists pada bulan November 1926.

Formasi Pangaea sekarang biasa dijelaskan dalam konsep lempeng tektonik (Gambar 3.9). Keterlibatan lempeng tektonik dalam pemisahan Pangaea membantu menunjukkan bagaimana ia tidak terpisah semuanya sekaligus, namun pada waktu yang berbeda, dalam urutan yang teratur. Selain itu, setelah pemisahan ini, juga telah ditemukan bahwa benua besar yang terpisah mungkin juga terus pecah beberapa kali. Pembentukan masing-masing lingkungan dan iklim di Pangaea disebabkan oleh lempeng tektonik, dan oleh karena itu, ini sebagai hasil dari pergeseran dan perubahan tekanan iklim yang berbeda ditempatkan pada kehidupan di Pangaea. Meskipun lempeng tektonik sangat penting dalam pembentukan daratan kemudian, hal itu juga penting dalam penempatan, iklim, lingkungan, habitat, dan keseluruhan struktur Pangaea. Yang juga bisa



diamati dalam kaitannya dengan lempeng tektonik dan Pangea, adalah formasi pada lempeng tersebut. Pegunungan dan lembah terbentuk karena tabrakan tektonik serta gempa bumi. Selanjutnya, lempeng tektonik dapat berkontribusi pada aktivitas vulkanik.

Beberapa bukti telah menunjukkan adanya pergerakan lempeng dari benua besar Pangea ini. Bukti fosil untuk Pangea mencakup keberadaan spesies serupa dan identik di benua yang jaraknya jauh berbeda. Misalnya, fosil *Lystrosaurus* yang ada di Afrika Selatan, India dan Antartika, di samping anggota flora *Glossopteris*, yang distribusinya berkisar dari lingkaran kutub ke khatulistiwa. Jika benua-benua tersebut berada pada posisi sekarang, itu tidak mungkin di jumpai fosil fosil tersebut pada benua benua yang berjauhan yang dipisahkan oleh lautan. Demikian pula, reptil air tawar *Mesosaurus* telah ditemukan di daerah terlokalisasi di pantai Brasil dan Afrika Barat.

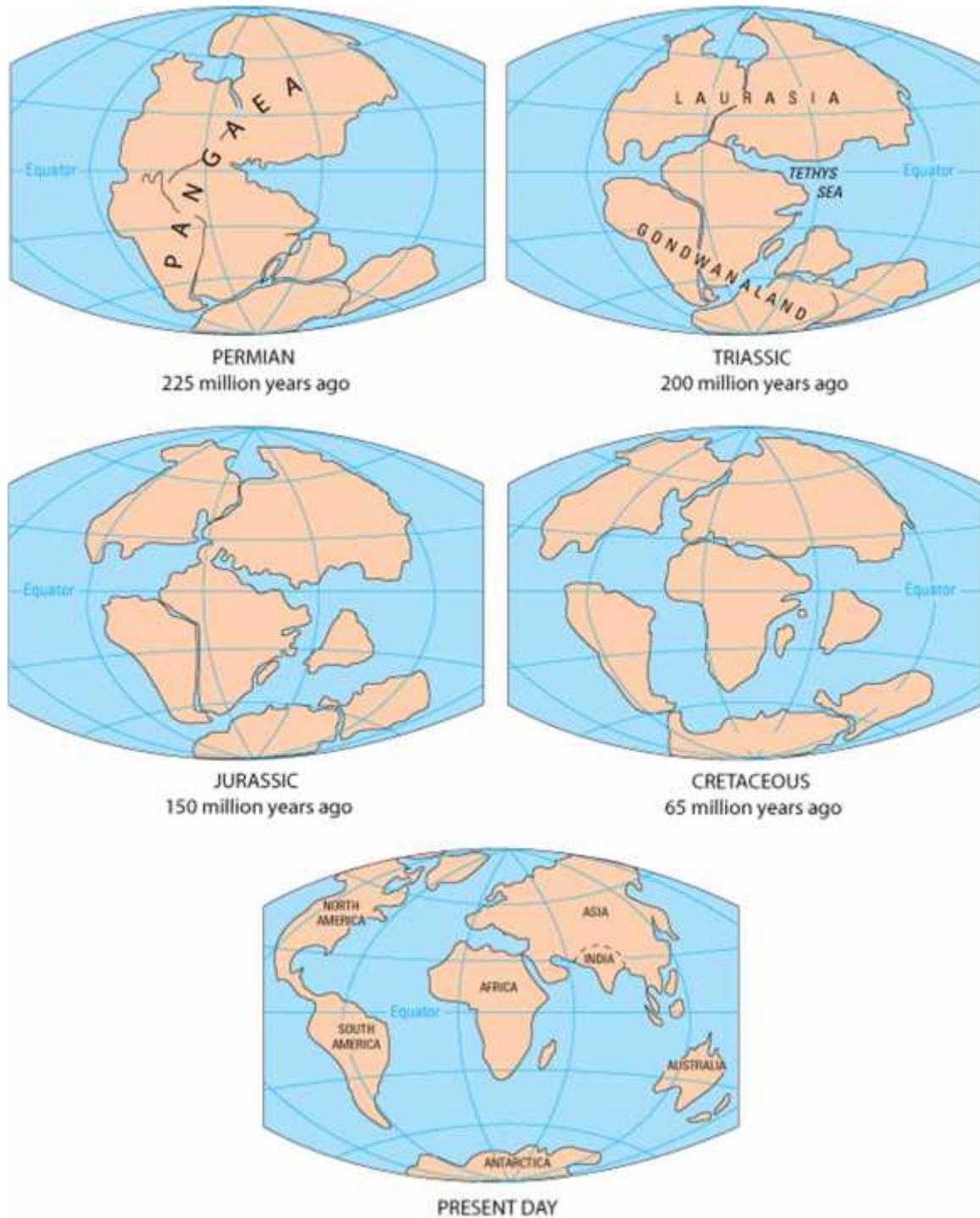
Bukti tambahan untuk Pangea ditemukan di geologi benua yang berdekatan, termasuk pencocokan tren geologi antara pantai timur Amerika Selatan dan pantai barat Afrika.

Studi paleomagnetik jalur pengembaraan kutub yang jelas juga mendukung teori supercontinent. Ahli geologi dapat menentukan pergerakan lempeng benua dengan memeriksa orientasi mineral magnetik pada batuan. Ketika batuan terbentuk, mereka mengambil sifat magnetik Bumi dan menunjukkan ke arah mana kutub relatif terhadap batuan yang terbentuk. Karena kutub magnet berubah rubah dengan jangka waktu hanya beberapa ribu tahun, pengukuran dari banyak lava yang mencakup beberapa ribu tahun rata-rata memberikan posisi kutub yang jelas. Sampel batuan sedimen dan batuan beku intrusif memiliki orientasi magnetik yang biasanya merupakan rata-rata "variasi sekuler" dalam orientasi magnet utara karena magnetisasi remanen mereka tidak diperoleh secara instan. Perbedaan magnetik antara kelompok sampel yang usianya bervariasi jutaan tahun disebabkan oleh

hanyutnya benua. Ini membuat ahli geologi menunjukkan pergeseran benua dan dapat digunakan untuk membantu merekonstruksi posisi kontinental sebelumnya.

Selanjutnya, rangkaian gunung memberikan bukti lebih lanjut untuk Pangaea. Salah satu contohnya adalah rangkaian Pegunungan Appalachian yang membentang dari Amerika Serikat bagian tenggara sampai Caledonides Irlandia, Inggris, Greenland, dan Skandinavia.

Pergerakan Tektonik Lempeng



Gambar 3.9. Pangaea terpecah jadi benua yang ada sekarang ini



Pertanyaan BAB III

1. Apakah yang menyebabkan terjadinya pergerakan lempeng-lempeng samudra?
2. Apa akibat pergerakan lempeng samudra yang saling menjauh pada zona pemekaran lantai samudra?
3. Apa perbedaan yang mendasar zona subduksi dengan zona collision?
4. Mengapa pada tumbukan lempeng samudera dan lempeng benua, lempeng samudera pada umumnya selalu masuk terhunjam dibawah lempeng benua?
5. Bagaimana hubungan tektonik lempeng dengan perubahan bentuk permukaan bumi?



Daftar Pustaka dan Tambahan Bacaan

1. Kent C. Condie (1997). Plate tectonics and crustal evolution (4th ed.). Butterworth-Heinemann. p. 5. ISBN 0-7506-3386-7.
2. Ctirad Matyska & David A Yuen (2007). "Figure 17 in Lower-mantle material properties and convection models of multiscale plumes". Plates, plumes, and planetary processes. Geological Society of America. p. 159. ISBN 0-8137-2430-9.
3. Kobes, Randy and Kunstatter, Gabor."Mantle Convection". Physics Department, University of Winnipeg.
4. Ricard, Y. (2009). "2. Physics of Mantle Convection". In David Bercovici and Gerald Schubert. Treatise on Geophysics: Mantle Dynamics. 7. Elsevier Science.
5. Gerald Schubert; Donald Lawson Turcotte; Peter Olson (2001). "Chapter 2: Plate tectonics". Mantle convection in the earth and planets. Cambridge University Press. pp. 16 ff. ISBN 0-521-79836-1.
6. Fukao, Yoshio; Obayashi, Masayuki; Nakakuki, Tomoeki; Group, the Deep Slab Project (2009-01-01). "Stagnant Slab: A Review". Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 37 (1): 19–46.
7. Gerald Schubert; Donald Lawson Turcotte; Peter Olson. "§2.5.3: Fate of descending slabs". Cited work. pp. 35 ff. ISBN 0-521-79836-1.
8. Foulger, G.R. (2010). Plates vs. Plumes: A Geological Controversy. Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-4051-6148-0.
9. Moresi, Louis; Solomatov, Viatcheslav (1998). "Mantle convection with a brittle lithosphere: thoughts on the global tectonic styles of the Earth and Venus". Geophysical Journal International. 133: 669–82.



Gempa bumi merupakan sebuah respon untuk memberikan kesetimbangan pada Bumi

