

**PEMETAAN UMUR RELATIF KEPULAUAN SPERMONDE
BERDASARKAN AKTIVITAS ^{14}C PADA KARANG DAN
SEDIMEN**

*MAPPING OF RELATIVE AGE SPERMONDE ARCHIPELAGO
BASED ON ACTIVITY ^{14}C IN CORAL AND SEDIMENT*

NUR FAIZAH AQILAH FIRMAN

H013181001



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2021

**PEMETAAN UMUR RELATIF KEPULAUAN SPERMONDE
BERDASARKAN AKTIVITAS ^{14}C PADA KARANG DAN
SEDIMEN**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi

Ilmu Kimia

Disusun dan diajukan oleh

NUR FAIZAH AQILAH FIRMAN

H013181001

Kepada

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

DISERTASI

**PEMETAAN UMUR RELATIF KEPULAUAN SPERMONDE
BERDASARKAN AKTIVITAS ^{14}C PADA KARANG DAN
SEDIMEN**

Disusun dan diajukan oleh

NUR FAIZAH AQILAH FIRMAN

H013181001

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
Pada tanggal 29 September 2021
dan dinyatakan memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasihat

Prof. Dr. Alfian Noor, M.Sc
Promotor

Dr. Sci. Muhammad Zakir
Ko-promotor

Dr. Maming, M.Si
Ko-promotor

Ketua Program Studi S3
Ilmu Kimia

Prof. Ahyar Ahmad, PhD

Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan di bawah ini

Nama : Nur Faiizah Aqilah Firman

Nomor Induk Mahasiswa : H013181001

Program Studi : S3 Ilmu Kimia

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, September 2021

Yang Menyatakan

A 1000 Rupiah postage stamp with a Garuda emblem and a handwritten signature over it. The stamp is yellow and red, with the text 'SEPULUH RIBU RUPIAH' and '1000' on the left, and 'METERAI TEMPEL' and '20' on the right. The serial number '9A38AJX484891152' is visible at the bottom left of the stamp.

Nur Faiizah Aqilah Firman

PRAKATA

Alhamdulillah Rabbilalamin, puji syukur dihaturkan kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, sebab atas rahmat dan karunia-Nya sehingga dapat diselesaikan penulisan disertasi yang berjudul “PEMETAAN UMUR RELATIF KEPULAUAN SPERMONDE BERDASARKAN AKTIVITAS ¹⁴C PADA KARANG DAN SEDIMEN” yang merupakan salah satu syarat guna memperoleh gelar Doktor dalam bidang Ilmu Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin Makassar.

Selama proses penelitian hingga diselesaikannya penulisan Disertasi ini, banyak didapatkan bimbingan, arahan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, diucapkan terima kasih kepada: Promotor, Bapak Prof. Dr. Alfian Noor, M.Sc, Ko-promotor, Bapak Dr. Sci. Muhammad Zakir M.Sc dan Bapak Dr. Maming, M.Si; Dewan Penguji Ibu Dr. Nursiah La Nafie, M.Sc, Bapak Dr. Syafyudin Yusuf, ST., M.Si dan Bapak Prof. Ahyar Ahmad, PhD.

Ucapan terima kasih kepada Dekan FMIPA Universitas Hasanuddin, Bapak Dr. Eng. Amiruddin, S.Si, M.Eng; Ketua Program Studi Doktor Ilmu Kimia Bapak Prof. Ahyar Ahmad, PhD beserta staf yang telah membantu untuk kelancaran studi bagi penulis selama mengikuti studi. Ucapan terimakasih tertuju kepada seluruh staf dosen Pasca Sarjana Ilmu Kimia atas ilmu yang telah diberikan selama perkuliahan.

Rasa Hormat Yang tinggi, cinta dan sayang kepada orang tua kami, Bapak Ir. Firman, M.Si (Alm) dan Ibu Ir. Nurlaeli Fattah, M.Si serta kedua mertua kami Bapak Dr. Ir. Muh. Irwan Yusuf, M.Si (Alm) dan Ibu Siti Fatimah, S.T., M.Si. Ucapan terima kasih kepada suami Achmad Fuad Fathurrahman, S.Pi., M.Sc atas kesabarannya terus mendukung penulis untuk menyelesaikan disertasi ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada saudara kami, Sri Wahyuni Firman, S.Pi., M.Si., Nur Aliah Ulfa, S.ST., Nur Azizah Azzahrah, S.KM., dan Muhammad Nur Amri Maárif Firman.

Kami mengucapkan terimakasih kepada Bapak Dr. Syafyudin Yusuf, ST. M.Si., sebagai dosen penguji sekaligus sebagai dosen yang membimbing

dan mengarahkan kami dalam proses pengambilan sampel di lapangan. Kami mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa kelautan Universitas Hasanuddin Muhammad Alauddin, Bilal Muzammil S., Muh. Rafdy Fauzan, Agung Putra Perdana, Muhammad Ilham, Muhammad Bahri, Naufal Miftahul Ghalib, dan Kasnita.

Kami mengucapkan kepada terimakasih Andi Tenri Sa'na, S.Si., M.Si., Adji Permatasari, S.Si., M.Si., dan Emmi Astuti, S.Si., atas bantuan di laboratorium selama penelitian

Terimakasih kami ucapkan kepada teman-teman mahasiswa Pascasarjana Kimia S2 2017, Andi Citra Junopia, Ita Hasmila, Ina Oktaviani S., Zulkifli Tuara, Riswandi, Mutmainnah, Amad Rifai, Dewi Lidiawati, Fatimah, Miftahul Jannah, Muhammaf Arham Yunus, Nada Pertiwi P., Sri Wahyuni, Rizal Irfandi, Andi Tenrisa'na, Nur Asmi, Yunita Pare Rombe, Fatimah, Ayu Safitri Agustina, Miftahul Jannah, Andi Fikrah, dan Abdul Fattah.

Terimakasih kami ucapkan kepada teman-teman mahasiswa PMDSU UNHAS Batch 3 Nur Asmi, Ayu Masyita, Ayun Dwi Astuti, Rachmat Hidayat, Nur Fatma, Nurfaidah, Nurjirana, Sufardin, Amriana, Lulu Adilla Latifah, A Rani Sahni Putri, Muhammad Afrisal, Gemala Hardinasinta, Ega Wicaksono, Andi Muhammad Yasser Hakim, Nurfadila Js, Andi Muliarni Okasa, Arini Ratnasari, Andi Rizky Arbaim Hasyar, Andi Agus Mumang, Munirah, Nur Rahma dan Budiman Yasir.

Terimakasih kami ucapkan kepada Universitas Hasanuddin, Kepada Kementerian Riset dan Teknologi, Indonesia atas Beasiswa Program Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul yang diberikan sehingga kami dapat melanjutkan studi S2 dan S3.

Terimakasih kepada Laboran XRF dan XRD (Heryanto, S.Si., M.Si), Laboratorium Produktivitas & Kualitas Perairan (Fitriyani, S.Si), Laboran Radiasi (Andi Tenri Sa'na, S.Si., M.Si.), Laboran Anorganik (Haslinda, S.Si, Nurul Hanna, Amd.), Laboran Organik, Laboran Biokimia (Mahdalia, S.Si, M.Si), Laboran Kimia Fisika (Sugeng Asropin, S.TP) dan Laboran Kimia Analitik (Fibiyanthi, S.Si).

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan disertasi ini, kritik dan saran sangat diharapkan untuk penyempurnaannya. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Aamiin.

Makassar, September 2021

Penulis

Nur Faiizah Aqilah Firman

ABSTRAK

NUR FAIIZAH AQILAH FIRMAN, *Pemetaan Umur Relatif Kepulauan Spermonde Berdasarkan Aktivitas ^{14}C pada Karang dan Sedimen*, (dibimbing oleh Alfian Noor, Muhammad Zakir, dan Maming).

Pemetaan umur relatif Kepulauan Spermonde berdasarkan aktivitas ^{14}C pada karang dan sedimen. Tahapan penelitian yang dilakukan yaitu identifikasi fosil karang di Kepulauan Spermonde, analisis karakteristik fisik sedimen, analisis kandungan kimia sedimen dengan menggunakan XRF, penentuan umur karang dan sedimen berdasarkan aktivitas Spesifik ^{14}C . Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa: 1) fosil karang yang ditemukan berupa *Porites* sp., *Hydnophora* sp., *Acropora* sp., *Seriatopora* sp., *Stylophora* sp., dan terdapat beberapa karang yang tidak dapat teridentifikasi; 2) rentang rata-rata ukuran butir sedimen dari kerikil (*gravel*) hingga pasir halus (*fine sand*). Kisaran ukuran butir ini yang paling mendominasi berupa pasir kasar (*coarse sand*). Ukuran butir sedimen yang paling sedikit ditemukan berupa pasir halus; 3) kandungan kimia sedimen yaitu CaO, SiO, MgO, SrO, TiO₂, dan Fe₂O₃. CaO yang melimpah mengindikasikan bahwa komposisi sedimen tersebut banyak terdapat unsur biogenik karbonat; 4) perbedaan aktivitas spesifik ^{14}C sedimen tidak Nampak pada kedalaman yang sama dengan zona yang berbeda. Namun, perbedaan kedalaman yang semakin meningkat menghasilkan penurunan aktivitas spesifik ^{14}C ; 5) *Porites* sp. menjadi jenis karang penyumbang tertinggi penyusun pulau karang di Kepulauan Spermonde. Fosil karang yang tidak dapat diidentifikasi banyak ditemukan mulai kedalaman 1 m. Jenis karang tidak menjadi faktor penentu perbedaan aktivitas ^{14}C pada pecahan karang yang ditemukan dari kedalaman yang relatif sama pada zona yang berbeda; 6) tren sedimen dari kedalaman yang sama di zona yang berbeda menunjukkan kesamaan umur. Hal ini dapat disebabkan oleh pembentukan Kepulauan Spermonde di atas terumbu karang yang terlokalisasi pada platform karbonat laut dangkal yang sama.

Kata kunci: sedimen, karang, aktivitas ^{14}C , pulau karang, Kepulauan Spermonde.

ABSTRACT

NUR FAIIZAH AQILAH FIRMAN, *Mapping the Relative Age of Spermonde Archipelago Based on ^{14}C Activities on Corals and Sediments*, (supervised by Alfian Noor, Muhammad Zakir, and Maming).

Mapping the relative age of the Spermonde Archipelago based on ^{14}C activity on corals and sediments. The study performed analysis to the sediment characteristics, the sediment chemical content using XRF, and determined the coral and sediment ages based on the ^{14}C specific activity. The results successfully reveal: 1) the identified coral species fossils are *Porites* sp., *Hydnophora* sp., *Acropora* sp., *Seriatopora* sp., *Stylophora* sp., and unidentified coral fossil; 2) the average size of the sediments are from gravel to fine sand. Coarse sand dominates the grain size of the sediments, while fine sand is the least in the sediment composition; 3) CaO, SiO, MgO, SrO, TiO₂, and Fe₂O₃ minerals compose the sediments. The CaO dominating composition indicates the major role of biogenic carbonate in the sediments; 4) the ^{14}C specific activity of the sediment at the same depth to the zone is relatively similar, but increasing depth results in a decrease in ^{14}C specific activity; 5) *Porites* sp. is the most abundant coral species that makes up coral islands in the Spermonde Archipelago. The unidentified coral fossil was found from a depth of 1 meter. Coral species is not a determining factor for differences in ^{14}C specific activity on coral fossils found from relatively the same depths in different zones; 6) trends in the sediments from the same depth in different zones show similarity in age. This was made possible by the formation of the Spermonde Archipelago on localized coral reefs on the same shallow marine carbonate platform.

Keywords: sediment, coral, ^{14}C activity, coral island, Spermonde Archipelago.

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	6
D. Manfaat Penelitian	7
E. Ruang Lingkup	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Kepulauan Spermonde	9
B. Terumbu Karang	10
C. Pulau Karang	14
1. Jenis Pulau Karang	14

2. Peran Organisme Laut dalam Pembentukan Pulau Karang	16
3. Data Tahapan dan Waktu Pembentukan Pulau Karang	18
D. Sistem Karbonat Laut	21
E. Radiokarbon	24
1. Pembentukan Radiokarbon	24
2. Penanggalan Radiokarbon	27
F. Radioaktivitas	28
1. Radioaktivitas	28
2. Partikel Beta (β)	29
G. Pencacah Sintilasi Cair (LSC)	29
1. Mekanisme Kerja	30
2. Komponen yang Dibutuhkan dalam Analisis Menggunakan LSC	31
3. Instrumentasi LSC	35
4. Sistem TDCR pada LSC Hidex 300 SL	36
5. Statistik Pencacah Sintilasi Cair	37
6. Penelitian yang Berkaitan dengan Penanggalan Radiokarbon dengan LSC	38
7. Metode Pra-perlakuan Contoh dalam Analisis Radiokarbon	41
H. Analisis Tekstur Sedimen	43
I. X-ray Fluorescence Spectrometry	45
1. Mekanisme Kerja	46
2. Perangkat Keras Spektrometer EDXRF	46
J. Kerangka Konseptual	47

K. Hipotesis Penelitian	50
BAB III METODE PENELITIAN	51
A. Waktu dan Lokasi Penelitian	51
B. Bahan dan Alat	51
C. Prosedur Penelitian	52
1. Metode Sampling	52
2. Identifikasi Fosil Karang	53
3. Analisis Sifat Fisik/ Tekstur Sedimen	54
4. Analisis Sifat Kimia Sedimen dengan menggunakan XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>)	55
5. Optimalisasi Perbandingan Sampel dan Koktail AquaLight LLT	55
6. Analisis ^{14}C pada Sampel Karang dan Sedimen	55
6.1 Pencucian Sampel	55
6.2 Absorpsi Karbon Dioksida	57
6.3 Penentuan Total Karbon	58
6.4 Pengukuran Aktivitas ^{14}C dalam Sampel Karang dan Sedimen dengan LSC Hidex 300 SL	58
6.5 Perhitungan Umur Sampel Karang dan Sedimen	59
6.6 Analitik Statistik	59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	61
A. Pengambilan Sampel	61
B. Fosil Karang di Kepulauan Spermonde	62
C. Distribusi Ukuran Butir Sedimen pada Beberapa Pulau di Kepulauan Spermonde	64
D. Kandungan Kimia Sedimen pada Beberapa Pulau di Kepulauan Spermonde	67

E. Tahap Preparasi Analisis ^{14}C : Optimalisasi Perbandingan Koktail AquaLight LLT dan Sampel	70
F. Aktivitas ^{14}C Sampel Sedimen di Kepulauan Spermonde	73
1. Waktu Optimum Pencacahan Sampel Sedimen	73
2. Aktivitas Spesifik ^{14}C pada Sampel Sedimen	74
G. Aktivitas ^{14}C Sampel Karang di Kepulauan Spermonde	76
1. Waktu Optimum Pencacahan Sampel Karang	76
2. Aktivitas Spesifik Sampel Karang	77
H. Umur Sedimen di Kepulauan Spermonde	79
I. Umur Karang di Kepulauan Spermonde	80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	83
A. Kesimpulan	83
B. Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	85

DAFTAR GAMBAR

nomor		halaman
1.	Pembagian Zona di Kepulauan Spermonde	10
2.	Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan sebaran terumbu karang	12
3.	Jenis Pulau Karang	15
4.	Proses dan jalur yang terkait dengan produksi dan pemecahan berbagai konstituen sedimen terumbu bioklastik umum	17
5.	Tren yang diprediksi sistem karbonat di laut	22
6.	Sistem Karbonat di Laut	23
7.	Produksi dan distribusi kosmogenik ^{14}C	24
8.	Prinsip dasar proses LSC	29
9.	Perbandingan nilai efisiensi dan TDCR	36
10.	Perbandingan nilai efisiensi deteksi dan TDCR pada LSC Hidex 300 SL	37
11.	Distribusi normal dan pencacahan data untuk sampel radioaktif yang dilakukan perhitungan sepuluh kali	38
12.	Prosedur untuk preparasi sampel dan pengukuran di Laboratorium Radiokarbon dan Tritium Zagreb	41
13.	Klasifikasi Ukuran Butir Sedimen	44
14.	Diagram Struktur Spektrometer EDXRF	47
15.	Skema Kerangka Konseptual	49
16.	Peta Lokasi Sampling di Kepulauan Spermonde	53
17.	Desain alat absorpsi CO_2	57
18.	Kandungan Kimia Sedimen pada Beberapa Pulau di Kepulauan Spermonde	68

19.	Hubungan perbandingan volume koktail AquaLight LLT: sampel anorganik dan nilai TDCR	71
20	Hubungan antara Nilai DPM dan Waktu Pencacahan (menit) pada Sampel sedimen	73
21	Grafik aktivitas spesifik ^{14}C sedimen pulau dengan variasi kedalaman 0,5; 1,0 dan 1,5 m di Kepulauan Spermonde	75
22	Hubungan antara Nilai DPM dan Waktu Pencacahan (menit) pada Sampel karang	77
23	Aktivitas spesifik ^{14}C sampel karang dengan variasi kedalaman di Kepulauan Spermonde	78
24	Umur sedimen pulau dengan variasi kedalaman 0,5; 1,0 dan 1,5 m di Kepulauan Spermonde	79
25	Umur sampel pecahan karang dengan variasi kedalaman di Kepulauan Spermonde	81

DAFTAR TABEL

Tabel		halaman
1.	Aktivitas Alami Sampel Radiokarbon Permukaan Bumi	26
2.	Aplikasi Penganggalan Radiokarbon	27
3.	Pelarut primer dan sifat fisiknya	32
4.	Penelitian yang Berkaitan dengan Penanggalan Radiokarbon menggunakan metode LSC	40
5.	Perbandingan penggunaan absorber CO ₂	43
6.	Logaritmik Folk and Ward	44
7.	Kategori Sortasi, Ukuran Kesimetrisan, dan Kurtosis	44
8.	Data Luas Pulau, dan Lokasi Pengambilan Sampel di Kepulauan Spermonde	61
9.	Hasil Identifikasi Fosil Karang (Ordo <i>Sclerectinia</i>) dari Kepulauan Spermonde	62
10.	Hasil Analisis Distribusi Ukuran Butir Sedimen dari Kepulauan Spermonde	64

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
Λ	Konstanta peluruhan radioaktif
$t_{1/2}$	Waktu paruh
N	Neutron
p	Proton
At	Radioaktivitas isotop ^{14}C dalam sampel
Ao	Radioaktivitas isotop ^{14}C pada saat tanaman atau hewan tersebut hidup
CPM	Cacahan Per Menit (Count Per Minutes)
DPM	Disintegrasi Per Menit
LSC	Liquid Scintillation Counter
AMS	Accelerator Mass Spectrometry
GPC	Gas Proportional Counter
PMT	Photo Multiplier Tube
TDCR	Efisiensi Pencacahan, Triple to Double Coincidence Ratio
BP	Before Present
EC	Electron Capture
RPH	Tinggi Pulsa Relatif
Bq	Becquerel, satuan turunan SI untuk keradioaktifan dan didefinisikan sebagai keaktifan sejumlah bahan radioaktif atau hilangnya satu nuklus setiap detiknya. Oleh karena itu, Becquerel sama dengan s^{-1}
Waktu paruh	Waktu yang diperlukan unsur radioaktif untuk meluruh hingga setengah dari konsentrasi awal
^{14}C	Radiokarbon, isotop radioaktif karbon dengan inti yang mengandung 6 proton dan 8 neutron
hv	High voltage (tegangan tinggi)
XRF	X-ray Fluorescence

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kepulauan Spermonde terletak di bagian selatan Selat Makassar, di pesisir barat daya Pulau Sulawesi. Kepulauan ini dikenal juga dengan nama Kepulauan Sangkakarang (Marzuki, 2018). Kepulauan Spermonde terdiri atas pulau-pulau karang dengan tingkat keanekaragaman karang yang tinggi, yaitu terdapat 78 genera dan sub genera dengan total 262 spesies (Moll, 1983). Hutchinson (1945) membagi Kepulauan Spermonde menjadi empat zona, yaitu zona pertama (*inner zone*), zona terdekat dari daratan Pulau Sulawesi dan substrat dasar didominasi oleh pasir berlumpur; zona kedua (*middle inner zone*) yang berjarak sekitar 5 km dari daratan Pulau Sulawesi dan banyak ditemukan pulau karang; zona ketiga (*middle inner zone*) yang berjarak sekitar 12,5 km dari Pulau Sulawesi dengan banyak ditemukan terumbu karang yang masih tenggelam; dan zona keempat (*outer zone*), berjarak sekitar 30 km dari daratan Sulawesi dan termasuk zona terumbu karang penghalang.

Pulau-pulau karang adalah akumulasi sedimen karbonat yang diendapkan langsung pada atau berdekatan dengan platform terumbu karang. Pulau karang dibangun dari sedimen berkapur yang bertumpu pada platform konglomerat karang membatu yang terbentuk secara biologis dari karang sekitarnya. Pembentukan pulau karang melalui 3 cara yaitu: 1) akumulasi puing-puing dan sedimen karang mati di atas terumbu karang

melalui aksi gelombang dan badai; 2) munculnya terumbu karang karena penurunan permukaan laut relatif; dan 3) peningkatan di dasar laut bagian bawah terumbu. Pulau-pulau terumbu karang yang dihasilkan dari pengangkatan tektonik substrat karang dapat berkisar dari beberapa hingga ratusan meter (Solihuddin, 2017; Muller-Parker, 2005).

Pulau-pulau karang dianggap sebagai salah satu bentang alam yang paling rentan di bumi karena umumnya berukuran kecil, elevasi rendah, dan secara fisik tidak stabil terhadap kondisi batas lingkungan. Hal ini telah menimbulkan kekhawatiran global atas kepekaan fisik bentang alam ini terhadap bencana alam yang dapat terjadi seperti tsunami, perubahan iklim global, dan kenaikan permukaan laut (Dickinson, 2009; Pala, 2014). Persepsi kerentanan pulau karang mengenai kenaikan permukaan laut masa depan seperti itu didasari oleh pengetahuan yang kurang lengkap mengenai kontrol lingkungan pada evolusi pulau karang. Adanya kesenjangan pengetahuan yang signifikan terhadap pemahaman evolusi pulau karang dalam skala waktu sangat mempengaruhi akurasi memprediksi keadaan pulau karang di masa depan.

Dampak kenaikan permukaan lautan perlu dipahami dalam rangka mengetahui tahapan evolusi pulau dari waktu ke waktu (Pala, 2014). Beberapa penelitian yang berkaitan dengan waktu pembentukan dan evolusi pulau karang yaitu kronologis terakhir pembentukan Pulau Jabat, Kepulauan Marshall yang dianalisis dengan menggunakan sampel berupa sedimen dan mikroatol. Hasil yang diperoleh menunjukkan bukti bahwa pembentukan pulau di Pasifik terjadi selama tahap terakhir kenaikan permukaan laut

di pertengahan zaman Holosen 4800-2000 tahun BP (Kench dkk., 2014). Analisis sampel sedimen, terumbu karang dan mikroatol di Pulau Bewik, bagian utara *Great Barrier Reef* menunjukkan bahwa pembentukan Pulau karang sekitar 6500-4000 tahun BP (Kench dkk., 2012). Waktu pembentukan pulau karang di Maladewa, Samudra Hindia, hampir sama dengan waktu pembentukan karang di Pulau Bewik yaitu sekitar 5500-4500 tahun BP (Kench dkk., 2005). Klerk (1982) mempelajari awal pembentukan terumbu karang di Selat Makassar dengan menggunakan metode penanggalan radiokarbon. Sampel yang dianalisis berasal dari Pulau Langkai, Pulau Kapoposang dan Pulau Samalona mengindikasikan bahwa perkembangan pulau karang sejak 7000 tahun BP, bersamaan dengan kenaikan permukaan laut sekitar 100 meter.

Penentuan umur tahapan pembentukan suatu pulau dapat menggunakan metode penentuan umur dengan penanggalan radiokarbon (^{14}C). Metode penanggalan ini didasarkan pada aktivitas ^{14}C pada suatu material dengan membandingkan aktivitas ^{14}C material tersebut dengan organisme hidup yang diketahui aktivitas ^{14}C (Nicelia dkk., 2013; Guta dan Polach, 1985).

Keberadaan ^{14}C di alam terlibat dalam siklus karbon. ^{14}C diproduksi di atmosfer atas, di mana neutron dari sinar matahari mencapai ^{14}N dan membentuk ^{14}C . Secara kimia, ^{14}C tidak dapat dibedakan dari ^{12}C dan ^{13}C , kemudian bergabung dengan siklus karbon di bumi melalui proses fotosintesis dan pertukaran CO_2 udara-laut. ^{14}C juga terdapat di laut, danau, sungai dan masuk dalam kerang, karang dan organisme laut lainnya. Ketika

organisme hidup, berlangsung kesetimbangan antara masuknya ^{14}C , aktivitas peluruhan dan keluarnya ^{14}C dari organisme ke lingkungan. Setelah kematian organisme terjadi, keseimbangan tersebut akan berhenti, sehingga aktivitas ^{14}C di dalam organisme mulai berkurang. Pengurangan aktivitas ^{14}C oleh peluruhan berkorelasi dengan waktu kematian organisme sehingga dapat diaplikasikan untuk penentuan umur suatu material (Hopley, 2011; Key, 2001; Hajdas, 2008).

Penentuan umur berdasarkan isotop karbon (^{14}C) dilakukan melalui beberapa metode, yaitu pencacah proporsional gas (GPC), *accelerator mass spectrometry* (AMS), dan pencacah sintilasi cair (LSC). Alat pencacah proporsional gas mampu mengukur partikel radiasi pengion dan energi yang dikandungnya dengan menghasilkan gas yang sebanding dengan energi radiasi. Namun, alat ini kurang sensitif terhadap kontaminasi udara (Duling, 2019). *Accelerator mass spectrometry* merupakan metode pencacahan atom yang sensitif untuk mendeteksi konsentrasi kelimpahan isotop alami dan radionuklida, namun harganya relatif lebih mahal. Pencacah sintilasi cair digunakan karena merupakan teknik utama untuk pengukuran radionuklida emisi beta, peluruhan radionuklida dengan penangkapan elektron, dan emisi alfa. Meskipun termasuk teknik radiometrik konvensional, LSC tetap kompetitif untuk pengukuran berbagai radionuklida. Keuntungan utama penggunaan LSC karena prosedur preparasi sederhana dan efisiensi pencacahan tinggi yang dapat mencapai 100%. Pencacah sintilasi cair Hidex 300 SL generasi terbaru dilengkapi dengan sistem TDCR (*triple to double*

coincidence ratio), suatu sistem yang mampu mengoreksi pemadaman secara simultan (Arjomand, 2010; Hidex, 2016; Hou, 2018).

Berdasarkan uraian tersebut, pada penelitian ini dilakukan pemetaan umur relatif Kepulauan Spermonde berdasarkan aktivitas ^{14}C yang terkandung pada karang dan sedimen menggunakan LSC Hidex 300 SL.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. bagaimana karakteristik fisik dan kimia sedimen pulau pada zona dalam (*inner zone*), zona pertengahan dalam (*middle inner zone*), zona pertengahan luar (*middle outer zone*), dan zona luar (*outer zone*) di Kepulauan Spermonde?
2. berapa aktivitas spesifik ^{14}C sampel karang dan sedimen pulau pada zona dalam (*inner zone*), zona pertengahan dalam (*middle inner zone*), zona pertengahan luar (*middle outer zone*), dan zona luar (*outer zone*) di Kepulauan Spermonde?
3. berapa umur karang dan sedimen yang diperoleh dari pulau pada zona dalam (*inner zone*), zona pertengahan dalam (*middle inner zone*), zona pertengahan luar (*middle outer zone*), dan zona luar (*outer zone*) di Kepulauan Spermonde?
4. apakah ada keterkaitan antara pembagian zona Kepulauan Spermonde dengan pemetaan umur relatif Kepulauan Spermonde?
5. apakah ada keterkaitan antara variasi kedalaman pengambilan sampel dengan umur relatif Kepulauan Spermonde?

6. apakah karang dan sedimen dapat dijadikan sebagai indikator untuk mengetahui umur relatif pulau di Kepulauan Spermonde?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. mengkarakterisasi sedimen secara fisik dan kimia pada zona dalam (*inner zone*), zona pertengahan dalam (*middle inner zone*), zona pertengahan luar (*middle outer zone*), dan zona luar (*outer zone*) di Kepulauan Spermonde,
2. menentukan nilai aktivitas ^{14}C karang dan sedimen pada zona dalam (*inner zone*), zona pertengahan dalam (*middle inner zone*), zona pertengahan luar (*middle outer zone*), dan zona luar (*outer zone*) di Kepulauan Spermonde,
3. menentukan umur karang dan sedimen pada zona dalam (*inner zone*), zona pertengahan dalam (*middle inner zone*), zona pertengahan luar (*middle outer zone*), dan zona luar (*outer zone*) di Kepulauan Spermonde,
4. menganalisis dan mengkaji umur relatif pulau berdasarkan penentuan umur karang dan sedimen terhadap zonasi di Kepulauan Spermonde,
5. menganalisis dan mengkaji keterkaitan antara variasi kedalaman pengambilan sampel dengan umur relatif Kepulauan Spermonde,
6. menganalisis dan mengkaji pengaplikasian karang dan sedimen sebagai indikator penentuan umur relatif pulau di Kepulauan Spermonde.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. meningkatkan pemahaman mengenai waktu pembentukan pulau di Kepulauan Spermonde,
2. sebagai penelitian awal dalam memprediksi respon pulau-pulau kecil terhadap perubahan iklim,
3. hasil penelitian ini dapat membuka jalan menuju pemahaman kajian kelautan berbasis aktivitas ^{14}C karang dan sedimen.

E. Ruang Lingkup/ Batasan Penelitian

Ruang lingkup/ batasan penelitian ini sebagai berikut:

1. ruang lingkup waktu
riset ini telah dilaksanakan selama 3 tahun, mulai bulan Agustus 2018- Juli 2021
2. ruang lingkup tempat
lokasi pengambilan sampel dilakukan yang di Kepulauan Spermonde terbagi atas empat zona yang terdiri atas zona dalam (Pulau Kayangan, Pulau Ballang Caddi, Pulau Karanrang); zona pertengahan dalam (Pulau Barrang Lompo, Pulau Pajenekang, Pulau Panambungan); zona pertengahan luar (Pulau Kodingareng Lompo, Pulau Bone Tambung, Pulau Sarappo); dan zona luar (Pulau Langkai, Pulau Papandangan, dan Pulau Suranti).

3. ruang lingkup keilmuan

penelitian ini menitikberatkan pada kimia radiasi berupa metode penanggalan radiokarbon, sedimentologi, dan geomorfologi Kepulauan Spermonde.

BAB II

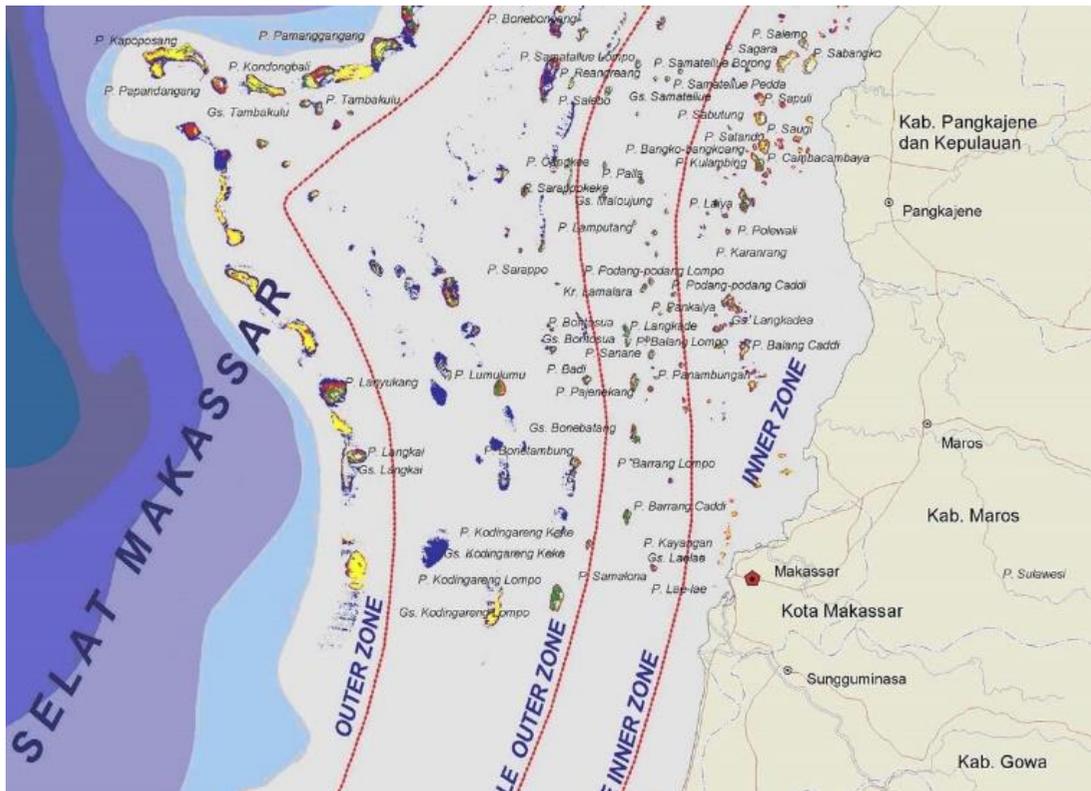
TINJAUAN PUSTAKA

A. Kepulauan Spermonde

Kepulauan Spermonde (*Spermonde Shelf*) membentang luas di barat daya Provinsi Sulawesi Selatan ($4^{\circ}00'S - 6^{\circ}00'S$ dan $119^{\circ}00'E - 119^{\circ}30'E$). Kepulauan ini memiliki ~120 pulau yang terdiri atas pulau pasir tidak bervegetasi (~70 pulau) dan pulau pasir bervegetasi (~50 pulau) (Kench dkk., 2017). Kepulauan Spermonde terdiri atas pulau-pulau karang yang terbentuk di atas terumbu karang datar yang terlokalisasi dalam platform karbonat laut dangkal (Suriamihardja, 2011; Kench dkk., 2017). Berdasarkan tingkat penyebaran karang, sekitar 80-87 % berada di daerah terumbu terluar (Marzuki, 2018). Hutchinson (1945) membagi Kepulauan Spermonde berdasarkan distribusi terumbu karang. Pembagian zona distribusi terumbu karang tersebut sering dijadikan sebagai dasar dalam penelitian yang berkaitan dengan terumbu karang di Kepulauan Spermonde. Pembagian zona distribusi tersebut, yaitu (Gambar 1):

- zona dalam (*Inner zone*): zona terdekat dari Pulau Sulawesi dengan kedalaman rata-rata 10 m.
- zona pertengahan dalam (*Middle inner zone*): berjarak sekitar 5 km dari Pulau Sulawesi dengan kedalaman laut rata-rata 30 m.
- zona pertengahan luar (*Middle outer zone*): dengan jarak mulai dari 12,5 km dari Pulau Sulawesi dengan kedalaman laut 20-50 km.

- zona luar (*Outer zone*): berjarak 30 km dari daratan utama Pulau Sulawesi dan merupakan zona terumbu karang penghalang. Pada sisi timur pulau-pulau memiliki kedalaman 40-50 m sedangkan pada sisi barat dengan kedalaman hingga 100 m lebih.



Gambar 1. Pembagian zona di Kepulauan Spermonde (Muller dkk., 2012)

B. Terumbu Karang

Terumbu karang merupakan ekosistem laut dangkal (\pm 1-40 m) yang memiliki tingkat keanekaragaman yang tinggi. Berbagai kelompok organisme memiliki peran dan fungsi sebagai suatu kesatuan ekosistem. Pembentuk utama terumbu karang adalah karang batu atau *scleractinia* yang bersimbiosis dengan alga bersel tunggal yang berada di jaringan endodermnya. *Scleractinia* berperan sebagai kerangka pembentuk terumbu,

sedangkan alga (*zooxanthella*) dan biota lain penghasil kapur berperan menyatukan kerangka dan material yang dibentuk oleh karang batu. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan sebaran terumbu karang ditunjukkan pada Gambar 2 (Nessa dkk., 2014; Suharsono, 2008):

1. Suhu

Suhu optimum untuk pertumbuhan terumbu karang adalah 27-29 °C. Adanya kenaikan suhu permukaan laut dapat mengakibatkan terumbu karang mengalami pemutihan (*bleaching*) dan apabila terus berlanjut dapat menyebabkan kematian.

2. Salinitas

Salinitas optimum untuk pertumbuhan karang berada dikisaran 30-36 ‰. Air dengan salinitas rendah dapat membunuh karang.

3. Cahaya

Karang hidup bersimbiosis dengan *zooxanthella* yang hidup di dalam jaringan karang. Alga *zooxanthella* memerlukan cahaya untuk melakukan fotosintesis. Oleh sebab itu, terumbu karang sulit tumbuh pada kedalaman yang sulit ditembus cahaya, atau biasanya kedalaman lebih dari 50 m.

4. Sedimentasi

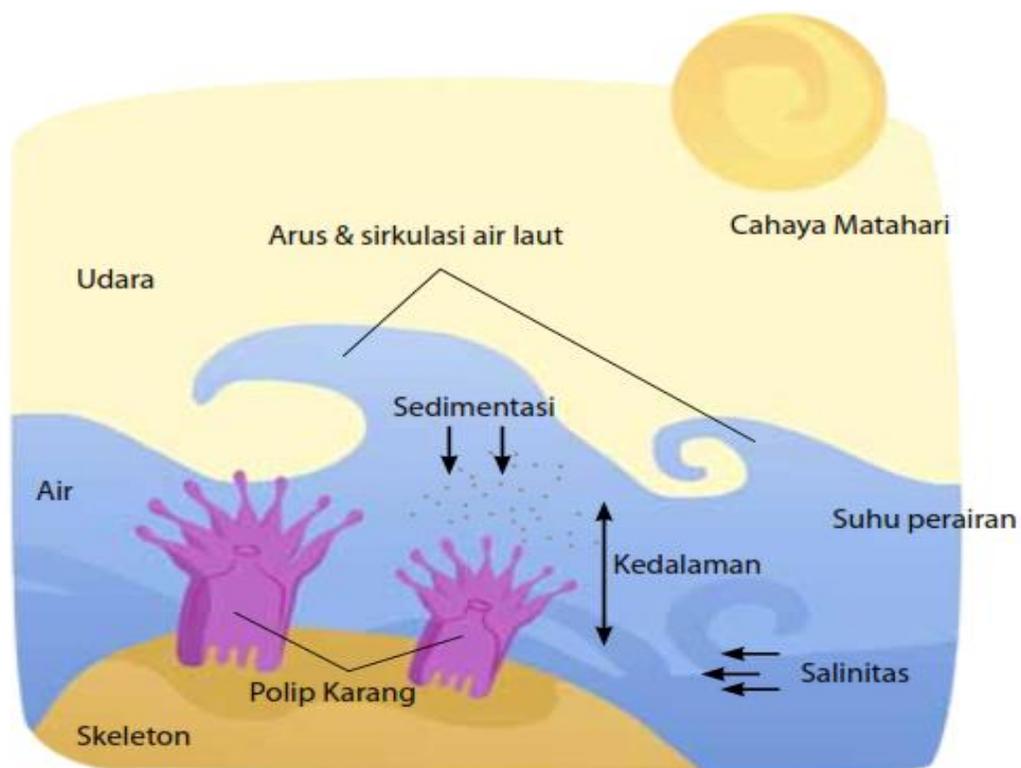
Sedimentasi mempengaruhi terumbu karang secara langsung dan tidak langsung. Secara langsung, adanya sedimen yang banyak dapat mengakibatkan tertutupnya polip terumbu karang sehingga dapat mengakibatkan kematian. Secara tidak langsung, adanya sedimen dapat menghalau penetrasi cahaya sehingga *zooxanthella* tidak dapat melakukan fotosintesis.

5. Kualitas perairan

Perairan yang tercemar limbah dapat mempengaruhi pertumbuhan karang. Adanya bahan pencemar (industri atau rumah tangga) dapat berpengaruh secara langsung terhadap pertumbuhan karang. Perairan yang keruh dapat menyebabkan terganggunya penetrasi cahaya ke dalam perairan sehingga dapat mengganggu fotosintesis *zooxanthella* yang bersimbiosis dengan karang.

6. Arus dan gelombang

Umumnya karang berkembang di daerah yang bergelombang besar. Hal tersebut disebabkan oleh adanya gelombang besar dapat memberikan pasokan oksigen yang besar, plankton yang baru untuk karang dan mencegah sedimen masuk ke dalam koloni karang.



Gambar 2. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan sebaran terumbu karang (Giyanto dkk., 2017)

Pembentukan terumbu karang membutuhkan waktu yang lama dan proses yang kompleks. Tahapan proses pembentukan, lokasi terbentuknya terumbu karang, proses geologi dan adanya perubahan permukaan laut mempengaruhi proses pembentukan terumbu karang. Beberapa tipe terumbu karang menurut lokasi dan tahap pembentukannya (Suharsono, 2008):

1. terumbu karang datar (*patch reef*): terumbu karang yang terbentuk dan proses tahapan pembentukannya belum mencapai permukaan laut.
2. terumbu karang tepi (*fringing reef*): terumbu karang yang tumbuh dan berkembang di tepi benua atau pulau dan mencapai kedalaman tidak lebih dari 40 m.
3. terumbu karang penghalang (*barrier reef*): terumbu karang yang terbentuk dan berkembang yang dekat dengan lereng benua dan terpisah dari pulau oleh goba yang dalam dan lebar
4. atol: terumbu karang yang terbentuk dan berkembang di pulau vulkanik yang mengalami penenggelaman secara perlahan-lahan ke dasar laut. Awalnya membentuk karang tepi, namun lama-kelamaan pulau tenggelam dan akhirnya membentuk terumbu karang berbentuk cincin yang mengelilingi goba.

Terumbu karang juga merupakan salah satu ekosistem tertua di dunia sehingga memiliki kekayaan dan variasi sejarah lebih dari ribuan juta tahun. Sejarah jangka panjang dari organisme karang hidup memberikan pengetahuan untuk melihat sejumlah proses evolusi dan ekologi fundamental selama jangka waktu yang lama yang tidak tersedia bagi ekologi modern

selama bertahun-tahun atau dekade, karena banyak organisme karang mengeluarkan kerangka kapur pada atau dekat kesetimbangan isotop dengan air laut (Pandofili, 2011).

C. Pulau Karang

Karang batu (*Scleractinia*) dan alga merupakan elemen yang paling berperan penting terhadap pembentukan terumbu karang. Ketika karang mati, skeletonnya hancur melalui proses erosi. Proses ini yang mengawali pembentukan pasir karang (karbonat) yang merupakan material dasar pembentukan pulau karang (Hoeksema, 1987).

1. Jenis Pulau Karang

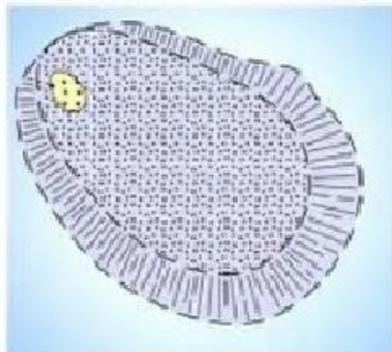
Bentuk pulau bergantung pada jenis sedimen dan mobilitasnya; lokasi dan bentuk platform terumbu; kondisi gelombang dan vegetasi yang telah tumbuh di atasnya (Short dan Woodroffe, 2009). Beberapa tipe pulau karang ditunjukkan pada Gambar 3 (Hopley dkk., 2007; Hopley, 2011; Jones dan Endean, 1977):

1. pulau pasir tidak bervegetasi: pulau karang sederhana, kecil dan tidak stabil.
2. pulau berbatu tidak bervegetasi: pulau karang tidak stabil, rentan terhadap perubahan dan erosi. Pulau ini merupakan hasil dari badai berenergi tinggi, membentuk batuan dan sedimen basal di tepi pulau.
3. pulau pasir bervegetasi: pulau pasir bervegetasi lebih stabil dibandingkan pulau pasir tidak bervegetasi tetapi masih dapat berubah secara morfologi. Vegetasi yang lebih besar secara

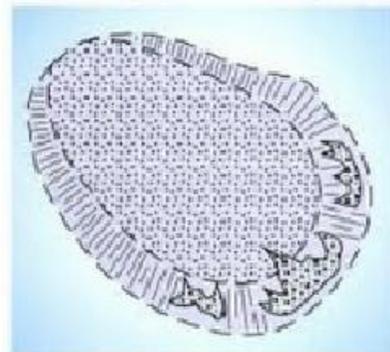
proporsional dan keberadaan batuan pantai meningkatkan kestabilan pulau.

4. pulau bakau: bakau dapat tumbuh diatas dataran terumbu dan mendorong akumulasi sedimen dan pembentukan pulau. Sedimen yang tersimpan di bawah bakau bervariasi dari gambut hingga lumpur karbonat.

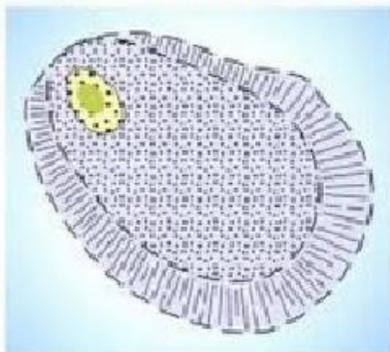
a. Pulau pasir tidak bervegetasi



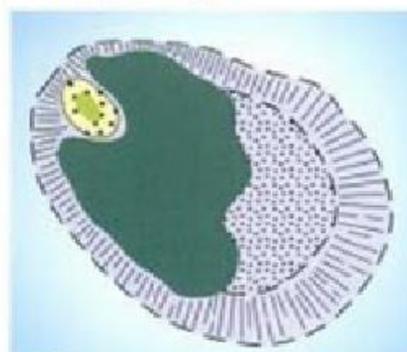
b. Pulau berbatu tidak bervegetasi



c. Pulau pasir bervegetasi



d. Pulau mangrove

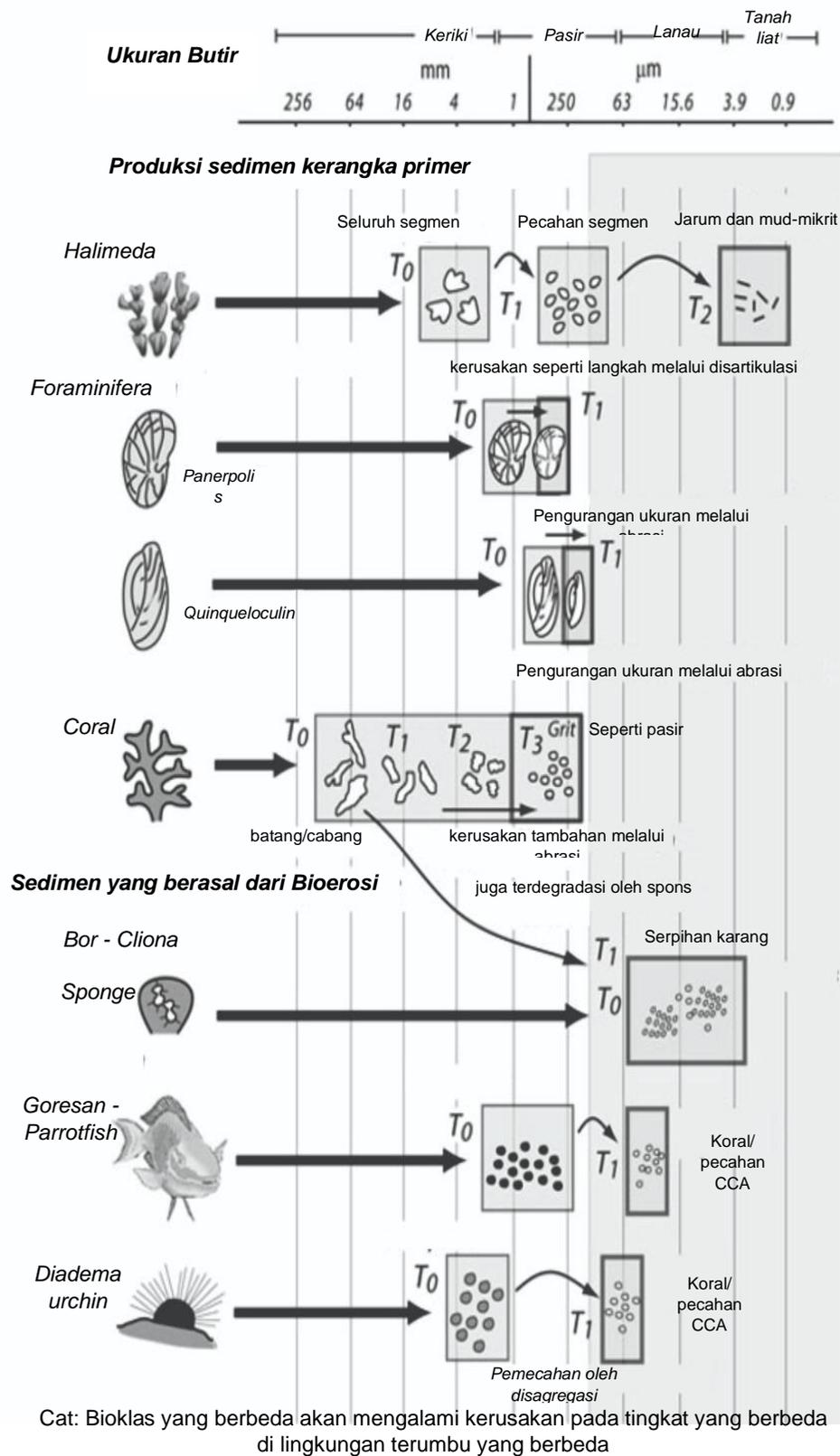


Fossil mikroatol Batuan Mangrove Pulau pasir Tepi terumbu Karangka Terumbu

Gambar 3. Jenis pulau karang (Hopley dkk., 2007)

2. Peran Organisme Laut dalam Pembentukan Pulau Karang

Organisme laut dengan bagian tubuh yang keras mengendapkan kalsium karbonat sebagai mineral kalsit atau aragonite. Karang, moluska, foraminifera, bryozoa, ganggang merah sangat produktif, serta beberapa spesies ganggang hijau (terutama *Halimeda*). Setelah kematian, organisme berkapur ini terurai (Gambar 4) oleh proses erosi fisik (abrasi dan fragmentasi), kimia (pelarutan) dan biologis (mikroboring) yang mengubah struktur kerangka utama sehingga menghasilkan butiran yang lebih halus. Kerentanan sumber sedimen karbonat sangat bervariasi dan dipengaruhi oleh mineralogi dan struktur kerangka. Fragmen karang paling rentan terhadap efek mikroboring. Lempeng *Halimeda* paling rentan terhadap penguraian. Berikut proses penguraian sumber sedimen karbonat laut (Perry, 2000; Perry dkk., 2011).



Gambar 4. Proses dan jalur yang terkait dengan produksi dan pemecahan berbagai konstituen sedimen terumbu bioklastik umum (Perry dkk., 2011)

Produsen dan sumber sedimen yang berbeda menghasilkan sedimen dengan ukuran butir titik awal (T0) yang berbeda. Dalam beberapa kasus, kerusakan ini terjadi secara terpisah seperti langkah yang ditunjukkan dengan panah melengkung; misalnya *Halimeda* T0–T1–T2. Jalur tersebut dikendalikan oleh struktur rangka (Perry dkk., 2011).

3. Data Tahapan dan Waktu Pembentukan Pulau Karang

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan data tahapan dan waktu pembentukan pulau karang dideskripsikan sebagai berikut yaitu:

3.1 Pertumbuhan Terumbu Karang Holosen di Maladewa: Bukti Kenaikan Permukaan Laut pada Pertengahan Holosen di Sentral Samudra Hindia

Sebuah penelitian (Kench dkk., 2009) menginvestigasi pertumbuhan *Holocene reef* dan histori ketinggian permukaan laut di Maladewa menggunakan tiga usia *reef core* yang dikalibrasi radiometrik. Terumbu terakhir dari zaman Interglasial (122 ± 7 ka atau ribu tahun, U-series) ditemukan pada kedalaman 14,1 m di bawah permukaan laut. Usia awal pertumbuhan karang *Holosen reef* tercatat tepat di atas zaman Pleistosen pada sekitar 8100 tahun kalibrasi *BP* (*before present*). Karang *in situ* besar muncul di semua inti dan konsistensi tiga plot kedalaman umur mengindikasikan terumbu tumbuh dengan stabil antara 8100 dan 6500 tahun kalibrasi *BP*, dan setiap penurunan 2000 tahun berikutnya.

3.2 Bukti Pembentukan Pulau Karang pada Kenaikan Permukaan Air Laut di Tengah Samudra Pasifik

Kench dkk., (2014) menginvestigasi waktu dan evolusi Pulau Jabat di Kepulauan Marshall menggunakan morfostratigrafi dan penanggalan radiometrik. Hasil riset tersebut pertama kali membuktikan waktu pembentukan pulau di Pasifik terjadi saat tahap akhir kenaikan permukaan laut *Holocene* yang dibagi atas tiga fase. Akumulasi cepat pasir kasar di Jabat pada awalnya terjadi pada 4800-4000 tahun *BP* melintasi *reef flat* lebih tinggi dari ketinggian saat ini akibat permukaan laut yang terus naik. Selama fase akhir dari kenaikan muka air (*highstand*) batas pulau khususnya margin barat bertambah secara vertikal hingga 2,5 m-3,0 m di atas *contemporary ridge*. Fase akumulasi ini didominasi oleh sedimen berukuran pasir. Fase ketiga melibatkan pengendapan *gravel ridge* pada terumbu bagian utara akibat permukaan laut turun ke posisi saat ini. Pulau Jabat menjadi stabil secara geomorfik selama 2000 tahun terakhir.

3.3 Model Baru Evolusi Pulau Karang Maladewa, Samudra Hindia

Sebuah model evolusi pulau karang diperkenalkan oleh Kench dkk., (2005), dengan mempelajari morfostratigrafi dan penanggalan radiometrik dari tiga pulau di Atol Maalhosmadulu Selatan (Pulau Dhakandhoo, Pulau Hulhodhoo dan Pulau Thiladhoo). Hasil yang diperoleh yaitu awalnya pulau-pulau tersebut terbentuk di atas dasar sedimen laguna antara 5500 dan 4500 tahun *BP* (*before present*) ketika permukaan karang berada pada kedalaman 2,5 m di bawah permukaan laut saat ini. Pulau-pulau tersebut terakumulasi dengan cepat di 1500 tahun berikutnya hingga mencapai bentuk yang efektif

pada 4000 tahun *BP*. Sejak saat itu, *peripheral ridge* pulau yang tinggi telah mengalami perubahan garis pantai musiman dan dalam jangka panjang, sementara terumbu bagian luar telah tumbuh ke atas, mengurangi aliran energi dan menunjukkan batas pulau-pulau. Model baru ini berimplikasi luas untuk stabilitas pulau selama periode pemanasan global dan peningkatan tinggi permukaan laut, yang akan mengaktifkan kembali sebagian aliran energi, meskipun tidak diharapkan menghambat pertumbuhan terumbu ke atas atau mengganggu stabilitas pulau.

3.4 Pembentukan Pulau Karang dan Stabilitas di Atas Dataran Terumbu yang Baru Muncul: Pulau Bewick, Great Barrier Reef Utara, Australia

Kench dkk., (2012) menguji sebuah model pembentukan pulau karang Bewick, *Great Barrier Reef* bagian utara, baik yang berkaitan dengan perkembangan substrat platform terumbu maupun perubahan tinggi permukaan laut pada pertengahan *mid-Holocene* menggunakan morfostratigrafi dan penganggalan radiometrik terumbu karang dan sedimen. Di Pulau Bewick, tercatat perkembangan terumbu karang mikroatol pada ketinggian permukaan laut yang lebih tinggi (+1,5 m) pada 6500 tahun *BP*. Pembentukan pulau dimulai di dataran terumbu yang muncul terlihat sebagian pada 5000–4000 tahun *BP* yang terjadi saat ketinggian permukaan laut 0,5 m lebih tinggi dari saat ini. Saat permukaan laut turun ke ketinggian seperti saat ini, proses pembentukan platform terumbu tertutup dan inti pulau menjadi stabil. Hasil inilah yang pertama kali dengan tegas membuktikan secara langsung proses pembentukan pulau di atas ratahan terumbu yang terdiri atas mikroatol dan menjadi model mendetail pertama dari

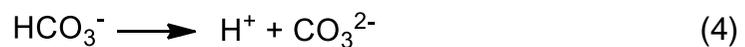
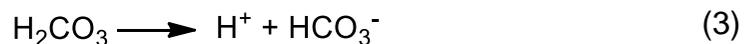
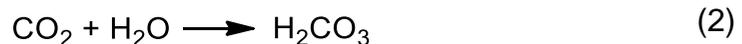
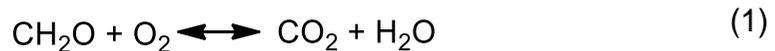
pembentukan pulau di *Great Barrier Reef*. Model tersebut menunjukkan bahwa interaksi antara permukaan laut dan elevasi permukaan terumbu dapat bervariasi antarlokasi tetapi konvergensinya sangat penting menjadi awal mula terbentuknya pulau.

D. Sistem Karbonat Laut

Berikut kontrol sistem karbonat pada distribusi laut

a. Fotosintesis/ respirasi

Bahan organik (diperkirakan sebagai CH_2O) diproduksi dan dikonsumsi sebagai berikut (Morse dan Mackenzie, 1990):



CO_2 dihasilkan selama respirasi, sehingga:



Tren tersebut akan menjadi kebalikan ketika tanaman di laut mengalami fotosintesis.

b. Pelarutan/ pengendapan CaCO_3



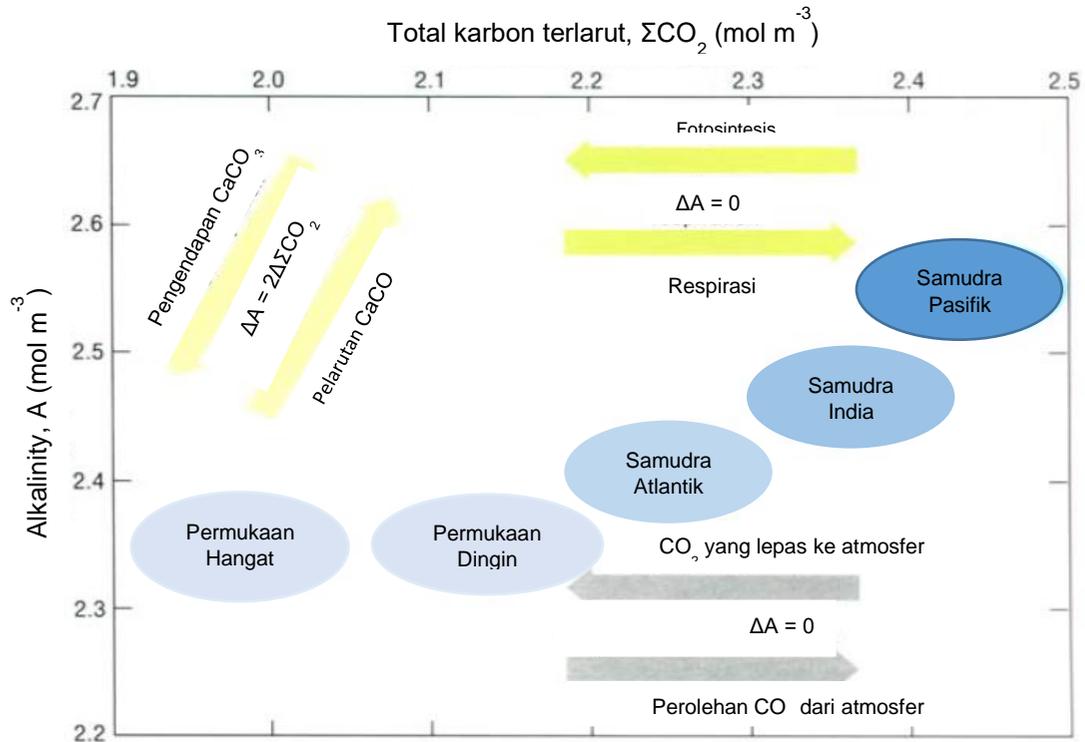
Juga dapat dituliskan sebagai (Morse dan Mackenzie, 1990):



$\text{CaCO}_{3(s)}$ melarutkan dan CO_3^{2-} larutan ditambahkan, kita sebaiknya mengamati:

$$\text{pH}\uparrow; \text{DIC}\uparrow; \text{Alk}\uparrow; \text{PCO}_2\downarrow \qquad \Delta\text{DIC} = 1; \Delta\text{Alk} = 2 \qquad (8)$$

Tren yang diprediksi oleh proses ini dapat dilihat pada Gambar 5:



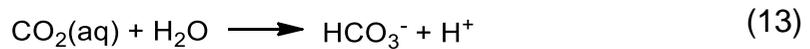
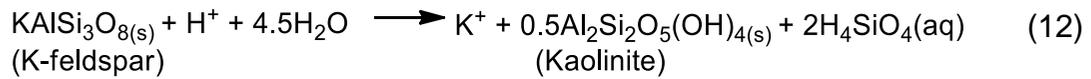
Gambar 5. Tren yang diprediksi sistem karbonat di laut

c. Mengontrol proses pelapukan

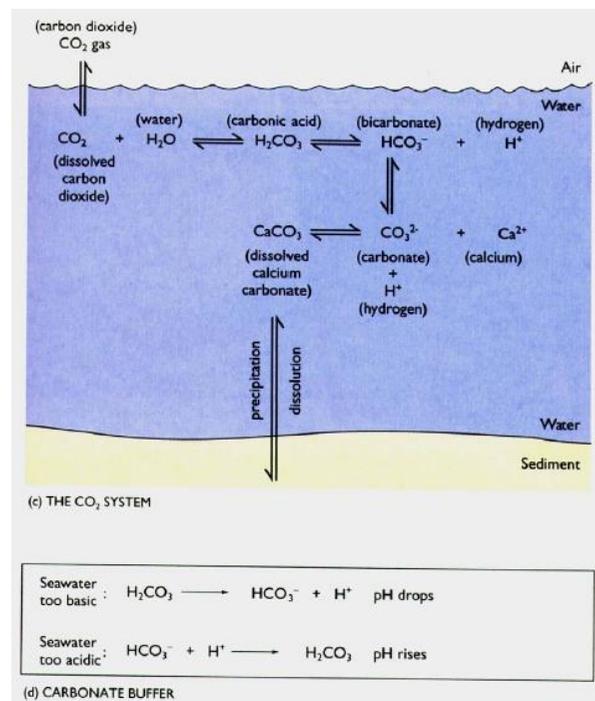
Pada skala global, ketidakseimbangan kation dan anion nonprotonasi disebabkan oleh pelapukan batuan (Morse dan Mackenzie, 1990).



Contoh:



Netralisasi asam (H^+) selama pelapukan menciptakan kelebihan kation yang diseimbangkan oleh anion asam lemah (alkalinitas). Komposisi batuan dan atmosfer menentukan alkalinitas dan pH keseluruhan. Pelapukan batuan karbonat adalah reaksi yang mirip dengan yang tertulis untuk pelarutan karbonat di laut. Reaksi pelapukan mengontrol alkalinitas keseluruhan dalam air laut tetapi proses biologis menentukan distribusi internal di dalam laut (Morse dan Mackenzie, 1990). Pada Gambar 6 menunjukkan sistem karbonat di laut.



Gambar 6. Sistem karbonat di laut

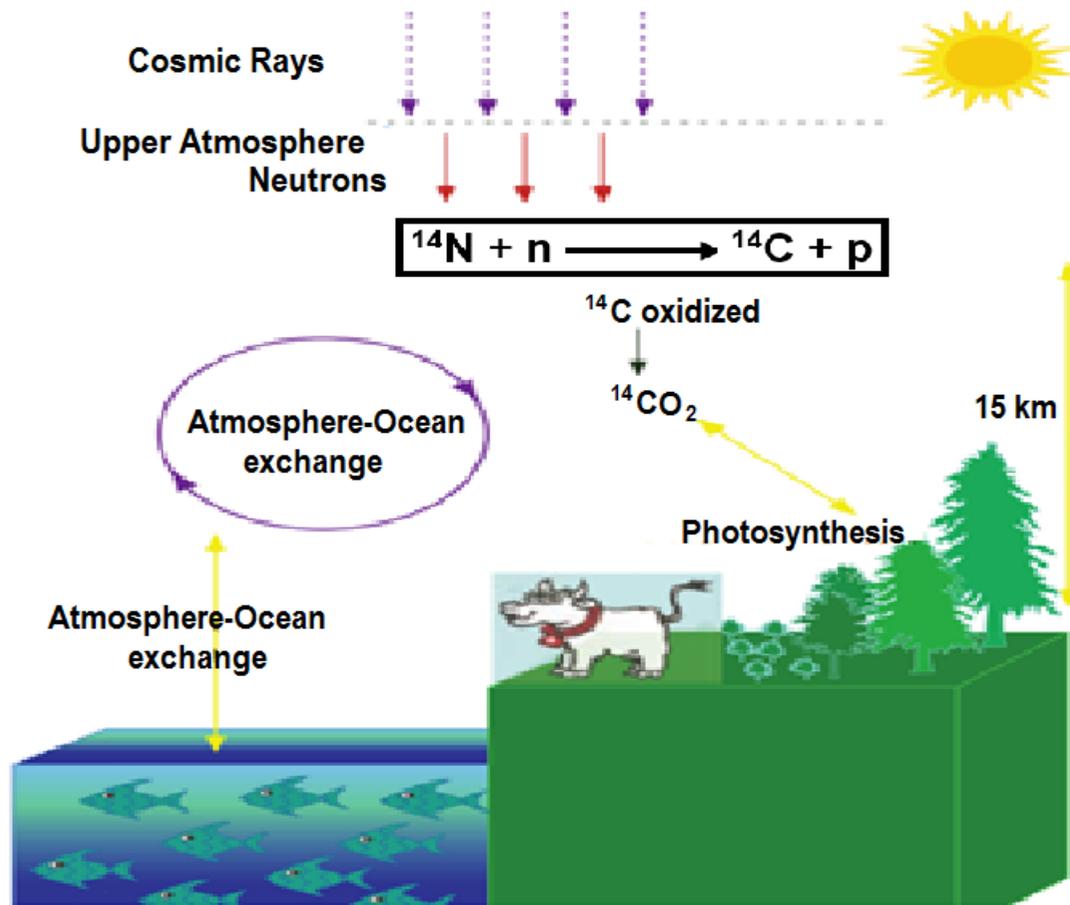
E. Radiokarbon

1. Pembentukan Radiokarbon

Karbon memiliki tiga isotop yang ditemukan di alam, yaitu ^{12}C , ^{13}C , dan ^{14}C . Kelimpahan ^{12}C sebesar ~99,8 % dari total karbon di bumi, ^{13}C sekitar 1 % dari total atom karbon, sementara ^{14}C terdapat 1 dalam setiap 1 juta atom karbon. ^{14}C bersifat radioaktif sehingga disebut juga radiokarbon. ^{14}C memiliki waktu paruh 5.730 tahun. Waktu paruh adalah waktu yang diperoleh untuk isotop radioaktif yang meluruh separuh dari bobot awalnya. Peluruhan ini terjadi secara konstan sehingga dapat digunakan untuk penanggalan (Hopley, 2011).

Siklus karbon mengontrol pertukaran ^{14}C di atmosfer, laut, biosfer dan sedimen (Gambar 7). ^{14}C diproduksi di atmosfer atas, di mana neutron dari sinar matahari mengenai ^{14}N dan membentuk ^{14}C . Secara kimia ^{14}C tidak dapat dibedakan dengan ^{12}C dan ^{13}C , kemudian bergabung dengan siklus karbon di bumi melalui proses fotosintesis dan pertukaran CO_2 udara-laut. Tanaman menggunakan ^{14}C selama proses fotosintesis, sementara organisme yang memakan tanaman mengambil ^{14}C tersebut. Di sisi lain, ^{14}C yang terlarut di laut, danau, dan sungai masuk ke dalam kerang, karang dan organisme laut lainnya. Saat hidup, organisme membentuk kesetimbangan radiokarbon dengan lingkungannya yaitu ^{14}C yang mengalami peluruhan dalam organisme digantikan oleh pengambilan ^{14}C dari lingkungan. Setelah mengalami kematian, kesetimbangan antara peluruhan radiokarbon dan ^{14}C yang masuk akan terhenti sehingga aktivitas ^{14}C mulai berkurang. Hilangnya ^{14}C oleh peluruhan dapat digunakan untuk menentukan waktu kematian

organisme (Key, 2001; Hopley, 2011; Hajdas, 2008). Aktivitas alami sampel radiokarbon di permukaan bumi terdapat pada Tabel 1.



Gambar 7. Produksi dan distribusi kosmogenik ^{14}C (Hajdas, 2008)

Tabel 1. Aktivitas alami sampel radiokarbon permukaan bumi (Libby, 1960)

Sumber	Lintang Geomagnetik	Aktivitas Spesifik Absolut (dpm/g)
Pohon Cemara Putih, Yukon	60° N	14,84 ± 0,30
Pohon Cemara Norwegia, Swedia	55° N	15,37 ± 0,54
Kayu Elm, Chicago	53° N	14,72 ± 0,54
<i>Fraxinus excelsior</i> , Swiss	49° N	15,16 ± 0,30
Honeysuckle Leaves, Oak Ridge, Tenn	47° N	14,60 ± 0,30
Ranting Jarum Pohon Pinus (12.000 ft. alt.), Mount Wheeler, New Mexico	44° N	15,82 ± 0,47
Briar Afrika Utara	40° N	15,82 ± 0,47
Oak, Sherafut, Palestina	34° N	14,47 ± 0,44
Jenis kayu tidak diketahui, Teheran, Iran	28° N	15,19 ± 0,40
<i>Fraxinus mandshurica</i> , Jepang	26° N	15,57 ± 0,31
Jenis kayu tidak diketahui, Panama	20° N	14,84 ± 0,30
<i>Chlorophora excels</i> , Liberia	11° N	15,94 ± 0,51
<i>Sterculia excels</i> , Capocabana, Bolivia (9.000 ft. alt)	1° N	15,08 ± 0,34
Kayu Ulin, Majoro, Kepulauan Marshall	0°	14,53 ± 0,60
Jenis kayu tidak diketahui, Ceylon	2° S	15,29 ± 0,67
Kayu Pohon Besar, Tierra del Fuego	45° S	15,37 ± 0,49
<i>Eucalyptus</i> , New South Wales, Australia	45° S	16,31 ± 0,43
Minyak anjing laut terbuat dari daging anjing laut dari antartika	65° S	15,69 ± 0,30
Jumlah Rata-rata		15,3 ± 0,1

2. Penanggalan Radiokarbon

Metode penanggalan radiokarbon adalah metode yang digunakan untuk mengetahui usia berbagai benda, baik benda organik maupun anorganik yang didasarkan pada hasil perhitungan aktivitas ^{14}C yang terkandung dalam benda tersebut atau didasarkan pada perbandingan banyaknya isotop radioaktif ^{14}C yang ada pada benda tersebut dengan sebuah sumber standar yang telah diketahui jumlah isotop radioaktifnya (Nicelia dkk., 2013; Guta dan Polach, 1985). Penelitian yang berkaitan dengan aplikasi penanggalan radiokarbon terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Aplikasi penanggalan radiokarbon

No	Lokasi	Sampel	Prakiraan Umur	Peneliti
1	Pulau Jabat, Kepulauan Marshall	sedimen dan mikroatol	4.800-2.000 tahun BP	Kench dkk., 2014
2	Pulau Bewik, Bagian utara <i>Great Barrier Reef</i>	sedimen, karang dan mikroatol	6500-4000 tahun BP	Kench dkk., 2012
3	Maladewa Selatan, Samudra Hindia	sedimen	5500-4500 tahun BP	Kench dkk., 2005
4	Pulau Langkai, Pulau Kapoposang dan Pulau Samalona	karang	7000 tahun BP	Klerk 1982
5	Kawasan Pantai Selatan Wonogiri	3 fosil karang	25.350 \pm 580; 24.740 \pm 540; 26.150 \pm 640 tahun BP	Astjario dan Siregar, 2008
6	Sepanjang aliran Sungai Opak dan Pantai Samas, Yogyakarta	Fosil moluska dan lempung karbonat	6950 \pm 300; 1980 \pm 120 tahun BP	Siregar dan Soehaimi, 2009

F. Radioaktivitas

1. Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah emisi radiasi yang berasal dari reaksi nuklir sebagai akibat dari peluruhan spontan inti atom yang tidak stabil. Peluruhan radioaktif dengan hilangnya energi oleh emisi partikel atau radiasi elektromagnetik dari sebuah atom karena perubahan di dalam intinya. Bentuk dari radiasi emisi radioaktif termasuk partikel alfa (α), partikel beta (β) dan sinar gamma (γ). Partikel α adalah yang paling ringan, paling massif dari produk peluruhan ini. Partikel α mengandung dua proton dan dua neutron dan dengan demikian terdiri atas inti helium yang stabil. Partikel β adalah elektron berenergi tinggi. Ini dihasilkan selama konversi neutron menjadi proton di nukleus. Partikel β dipancarkan bersama dengan neutrino. Sinar gamma berbeda dari emisi α dan β . sinar gamma bersifat radiasi elektromagnetik (*National Diagnostics Laboratory Staff, 2004; L'Annunziata, 2011*). Peluruhan zat radioaktif berdasarkan pada reaksi orde satu. Persamaan dapat ditulis sebagai berikut (Astjario dan Siregar, 2008):

$$-\int \frac{dN}{N} = \lambda \int dt \quad (15)$$

$$t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{N_0}{N} \quad (16)$$

N_0 = aktivitas isotop C^{14} pada saat tanaman dan hewan (masih hidup)

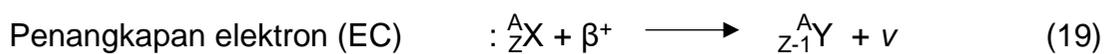
N = aktivitas isotop C^{14} dalam makhluk hidup yang telah mati

λ = konstanta peluruhan

$t_{1/2}$ = waktu paruh

2. Partikel Beta (β)

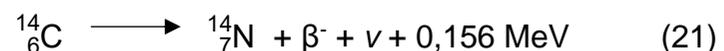
Peluruhan β didefinisikan sebagai proses peluruhan inti, dimana terjadi perubahan pada nomor atom (Z), namun nomor massa tetap (A). Terdapat tiga tipe peluruhan beta: (i) emisi negatron (β^-), yang terlibat emisi partikel beta negatif atau elektron negatif dari inti; (ii) emisi positron (β^+) dimana partikel beta positif atau elektron muatan positif dipancarkan dan (iii) penangkapan elektron (EC), yang tidak menghasilkan emisi pada setiap partikel beta (L'Annunziata, 2012; Wiyatmo, 2009):



Negatron atau partikel β^- adalah elektron yang dipancarkan dari inti radionuklida yang mengalami peluruhan dan kelebihan neutron atau ketidakseimbangan n/p . Ketidakseimbangan n/p mengakibatkan ketidakseimbangan inti sehingga terjadi perubahan neutron ke proton dalam inti sesuai reaksi (20):



Sebagai contoh, peluruhan ^{14}C dengan pemancaran β^- terdapat pada reaksi (21):



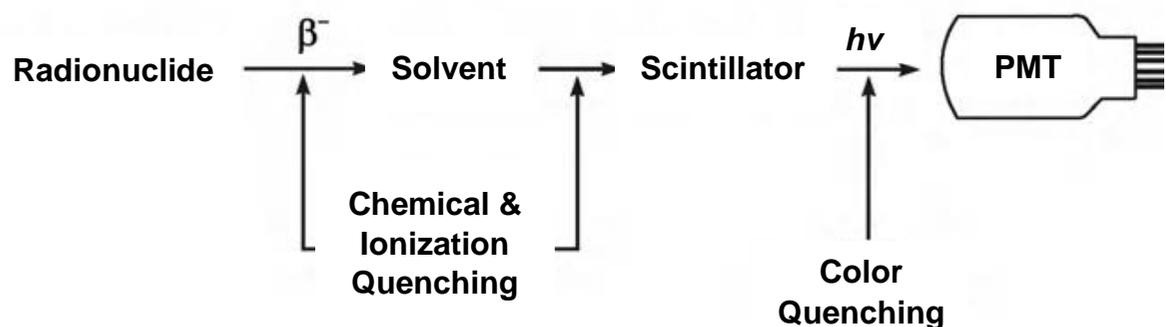
G. Pencacah Sintilasi Cair (LSC)

LSC merupakan teknik yang sangat populer untuk mendeteksi dan pengukuran kuantitatif radioaktivitas sejak awal 1950-an. Teknik ini sangat

berguna untuk studi ilmu kehidupan dan lingkungan dan merupakan teknik yang sangat penting untuk pengukuran mengenai radionuklida pemancar α dan β (L'Annunziata, 2012)

1. Mekanisme Kerja

Sampel yang dianalisis radioaktivitasnya dicampurkan dengan koktail. Molekul pelarut mengandung cincin aromatik yang dapat menyerap sebagian besar energi radiasi nuklir yang dipancarkan oleh radionuklida dalam koktail. Energi yang diserap oleh molekul pelarut ditransferkan ke dalam sintilator organik. Pencampuran dengan koktail bertujuan untuk mengubah energi peluruhan nuklir menjadi cahaya. Foton cahaya dideteksi oleh tabung *photomultiplier* (PMT). Tabung *photomultiplier* mengubah foton cahaya menjadi aliran elektron (pulsa listrik) yang akhirnya dimasukkan ke dalam analisa ketinggian pulsa listrik multichannel. Gambar 8 menunjukkan prinsip dasar proses LSC (L'Annunziata, 2012).



Gambar 8. Prinsip dasar proses LSC (L'Annunziata, 2012)

Energi yang diserap oleh koktail sebanding dengan terang cahaya yang dihasilkan. Tritium, menghasilkan partikel beta berenergi rendah

($E_{\max} = 8,6 \text{ keV}$), akan menghasilkan intensitas cahaya yang relatif sangat rendah untuk setiap partikel beta yang diserap dalam koktail, seperti cahaya redup dari lampu. Namun, ^{32}P merupakan partikel beta energi tinggi ($E_{\max} = 1710 \text{ keV}$), akan menghasilkan intensitas cahaya sekitar 100 kali lebih terang. Dengan demikian, intensitas cahaya yang dipancarkan oleh koktail merefleksikan energi peluruhan nuklir asli, dan jumlah serpihan cahaya per satuan waktu sebanding dengan jumlah peluruhan nuklir dalam unit waktu itu atau, dengan kata lain, sampel radioaktivitas dan dinyatakan dengan disintegrasi per menit atau DPM (L'Annunziata, 2012).

2. Komponen yang Dibutuhkan dalam Analisis Menggunakan LSC

a. Botol Sampel

Botol plastik dan kaca memiliki kelebihan dan kekurangan dalam hal latar belakang (*background*), permeabilitas pelarut, kerapuhan, transparansi dan lain-lain. Botol plastik tidak mudah pecah, lebih murah dan menampilkan latar belakang yang lebih rendah dibandingkan dengan botol kaca. Botol kaca memiliki kelebihan dalam hal transparansi untuk memvisualisasikan sampel dan koktail dalam hal warna residu dan homogenitas (L'Annunziata, 2012).

b. Koktail

Saat ini, banyak koktail yang tersedia komersial dan dibuat agar kompatibel dan dapat langsung dicampur dengan sampel yang larut dalam pelarut organik atau media air (*aqueous*). Koktail dapat dibagi menjadi dua kelompok utama, koktail organik dan koktail pengemulsi. Koktail organik memiliki dua komponen yaitu pelarut organik aromatik dan sintilator. Koktail

pengemulsi memiliki tiga komponen yaitu pelarut organik aromatik, emulsifier (sulfaktan) dan sintilator. Pemilihan pelarut, sintilator dan sulfaktan dipertimbangkan berdasarkan oleh kebutuhan transfer energi yang efisien dalam proses pencacahan dan kebutuhan terhadap sintilator yang aman dalam hal toksisitas rendah, titik nyala tinggi dan biaya. Berikut komponen koktail (L'Annunziata, 2012):

- Pelarut sintilator (pelarut primer dan pelarut sekunder)

Pelarut primer berfungsi mengubah energi kinetik radiasi menjadi energi eksitasi. Pelarut primer memiliki struktur kimia yang membuatnya menjadi efisien dalam mengubah energi kinetik radiasi menjadi energi eksitasi. Transfer energi yang paling efisien terjadi dalam pelarut organik aromatik. Berikut ini pada Tabel 3 terdapat pelarut primer yang biasa dipakai dalam metode LSC (L'Annunziata, 2012; Intan-Tjahaja dan Mutiah, 2000).

Tabel 3. Pelarut primer dan sifat fisiknya

Pelarut	RPH*	Titik Leleh	Flash Point (°C)
Pseudocumene	1,12		120
p-xylene	1,10	12-13	86
m-xylene	1,07		77
Xylene (campuran isomer)	1,05		77-90
Toluene	1,00		40
o-xylene	0,98		90
Benzene	0,85	5,5	12
1,4 Dioxan/naftalen	0,65	11,8	24

*RPH = *relative pulse height* terhadap toluene, pelarut mengandung 3,8 g/L PPO

Beberapa sifat fisik pelarut primer yang penting yaitu tinggi pulsa relatif (RPH), titik leleh, dan *flash point*. RPH merupakan ukuran efisiensi dalam konversi energi dari pelarut. Titik leleh dipertimbangkan karena pelarut akan kehilangan kemampuan transfer energinya dalam keadaan beku. Data *flash point* diperlukan sebagai bahan evaluasi bahaya percikan api dalam larutan sintilator (Intan-Tjahaja dan Mutiah, 2000).

Pelarut sekunder berfungsi meningkatkan efisiensi pelarut primer. Pelarut sekunder diperlukan untuk sampel yang tidak larut dalam pelarut primer sehingga terbentuk larutan yang homogen. Etoksietanol atau metoksimetanol dapat dipakai sebagai pelarut sekunder untuk sampel dengan polaritas yang tinggi. Pelarut sekunder lainnya adalah sulfaktan atau detergen. Detergen digunakan untuk membawa fase air ke dalam fase organik membentuk mikroemulsi. Kontak dekat semacam itu memungkinkan transfer energi yang efisien, yang berarti bahwa radioisotop dalam larutan (fase air) dapat diukur secara kuantitatif dan kualitatif. Beberapa detergen yang dapat digunakan dalam koktail LSC, seperti etoksilat (alkil fenol etoksilat (APE), alkil, alkil aril sulfonat, alkohol sulfat, alkil sulfoksinat, fosfat ester (PEs), imidazolines dan karboksilat (L'Annunziata, 2012; Intan-Tjahaja dan Mutiah, 2000).

- Sintilator (sintilator primer dan sintilator sekunder)

Fluor atau sintilator adalah transduser cahaya yang mengkonversi energi nuklir menjadi foton cahaya. Semua koktail LSC mengandung satu atau dua sintilator. Sintilator primer berperan untuk pertukaran energi awal atau primer, tetapi panjang gelombang cahaya yang dipancarkan tidak

sesuai dengan optimal deteksi panjang gelombang PMT. Oleh karena itu, sintilator sekunder ditambahkan untuk mencocokkannya dengan detektor PMT (L'Annunziata, 2012).

Derivatif dari *oxazoles*, *ozadiazoles*, *phenylenes*, *p-oligophenylenes*, *stryrilbenzenes*, *benzoxazoles*, *benzoxazolyl thiophenes*, *pyrazolines*, dan *nitril* memiliki sifat kilau dan merupakan sintilator potensial. Konsentrasi sintilator menentukan hasil foton dari sebuah sintilator cair (L'Annunziata, 2012).

PPO	<i>2,5-diphenylozalole</i>
PPD	<i>2,5-diphenyl-1,3,4-oxadiazole</i>
PBO	<i>2-(4-biphenylyl)-5-phenyloxazole</i>
PPD	<i>2-phenyl-5-(4-biphenylyl)-1,3,4-oxadiazole</i>
BBD	<i>2,5-di-(4-biphenylyl)-1,3,4-oxadiazole</i>
Butyl-PBD	<i>2-(4-t-butylphenyl)-5-(4-biphenylyl)-1,3,4-oxadiazole</i>
BBOT	<i>2,5-bis-2-(5-t-butyl-benzoxazolyl) thiophene</i>
TP	<i>p-terphenyl</i>

Sintilator primer yang paling banyak digunakan adalah PPO. PPO memiliki kelebihan dari segi kinerja, kemurnian, biaya dan ketersediaan dalam skala besar. Butil-PBD juga kadang-kadang digunakan, walaupun memiliki kekurangan yaitu berubah menjadi kuning ketika terjadi kontak dengan alkalin (L'Annunziata, 2012).

Terdapat banyak sintilator sekunder yang dapat digunakan, namun hanya beberapa yang umum digunakan. Beberapa sintilator yang penting yaitu (L'Annunziata, 2012):

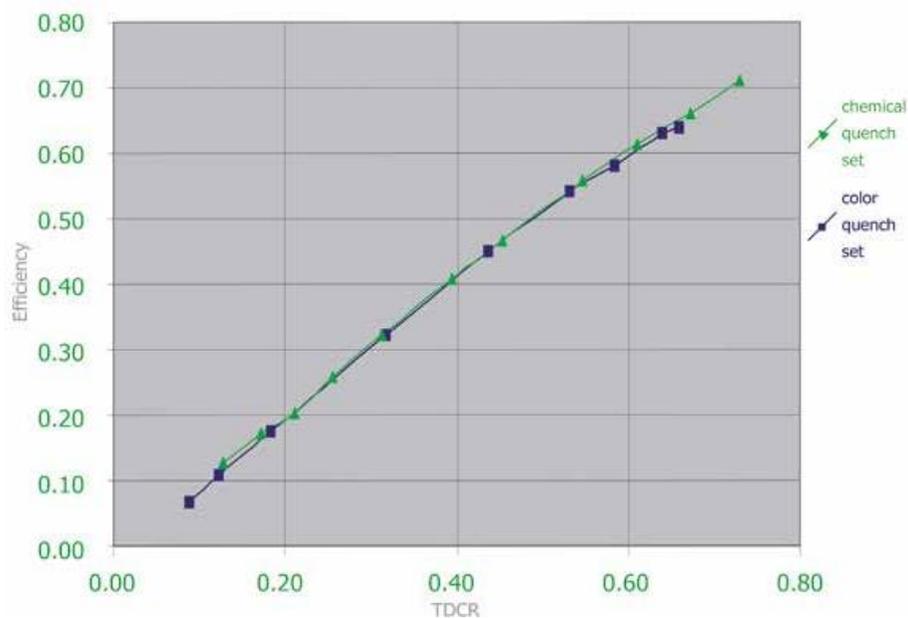
bis-MSB	<i>p-bis-(o-methylstyryl)benzene</i>
POPOP	<i>1,4-bis-2-(5-phenyloxazolyl)benzene</i>
Dimethyl POPOP	<i>1,4-bis-2-(4-methyl-5-phenyloxazolyl)benzene</i>
NPO	<i>2-(1-naphthyl)-5-phenyloxazole</i>
NPD	<i>2-(1-naphthyl)-5-phenyl-1,3,4-oxadiazole</i>
BBO	<i>2,5-di(4-biphenylyl)oxazole</i>
PBBO	<i>2-(4-biphenylyl)-6-phenylbenzoxazole</i>

3. Instrumentasi LSC

Komponen LSC berupa tabung pengganda foton atau *photomultiplier tube* (PMT), penguat (*amplifier*), pemisah (*discriminator*), dan pencacah (*counter*) pulsa. Tabung pengganda foton mengubah pancaran foton menjadi pulsa listrik. Pulsa listrik yang dihasilkan oleh PMT dalam bentuk sinyal analog sehingga diperlukan penguat untuk memperbesar amplitudo sinyal tersebut. Diperlukan dua jenis penguat sinyal, yaitu penguat mula (*pre amplifier*) untuk memperbesar sinyal dan penguat utama (*main amplifier*) yang berfungsi untuk memperbesar sinyal keluaran dari penguat mula yang selanjutnya diteruskan ke detektor. Sinyal yang keluar dari detektor tidak terlepas dari derau yang dapat mempengaruhi hasil cacahan sehingga diperlukan pemisah (*discriminator*) untuk memisahkan derau dari sinyal (misalnya tingkat pemisahan diatur 2 volt sehingga sinyal yang lebih rendah dari 2 volt tidak dapat terdeteksi). Selanjutnya, sinyal yang bebas derau masuk ke pencacah atau *counter* (Intan-Tjahaja dan Mutiah, 2000).

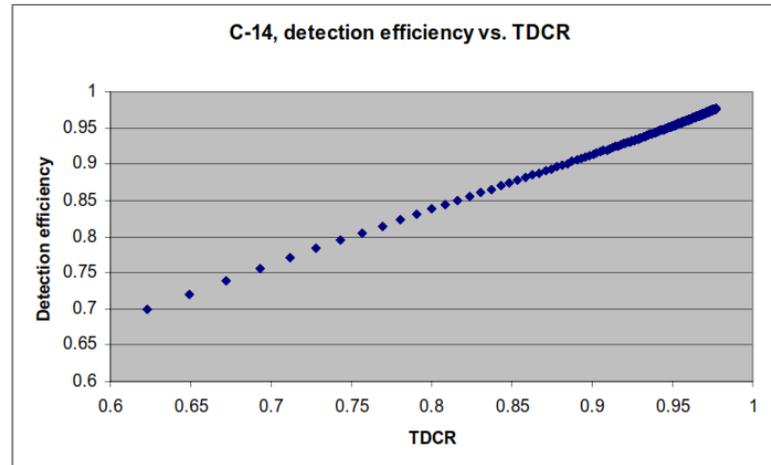
4. Sistem TDCR pada LSC Hidex 300 SL

LSC Hidex 300 SL dilengkapi dengan tiga detektor *photomultiplier*. Hal ini memungkinkan rasio perhitungan TDCR (*triple to double coincidence ratio*) tiga kali lipat. TDCR merupakan metode perhitungan absolut untuk mendapatkan efisiensi pencacahan sampel tanpa standar eksternal atau internal. Korelasi antara tingkat pemadaman (efisiensi pencacahan) dan pengukuran TDCR ditetapkan untuk koreksi pemadaman. Metode perhitungan TDCR berlaku untuk pemadaman kimia dan warna, sampel larutan dan organik, berbagai koktail dan berbagai isotop. LSC berbasis TDCR tidak membutuhkan penggunaan standar eksternal untuk memonitor pemadaman (Hidex, 2016; Hou, 2018). Perbandingan nilai efisiensi dan TDCR terdapat pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan nilai efisiensi dan TDCR (Hidex, 2016)

TDCR mewakili proses emisi cahaya dari radionuklida yang diukur. Nilai TDCR berbanding lurus dengan efisiensi secara keseluruhan pada analisis radionuklida pemancar β murni. Perbandingan nilai efisiensi deteksi ^{14}C terhadap nilai TDCR terdapat pada Gambar 10 (Casette, 2010).

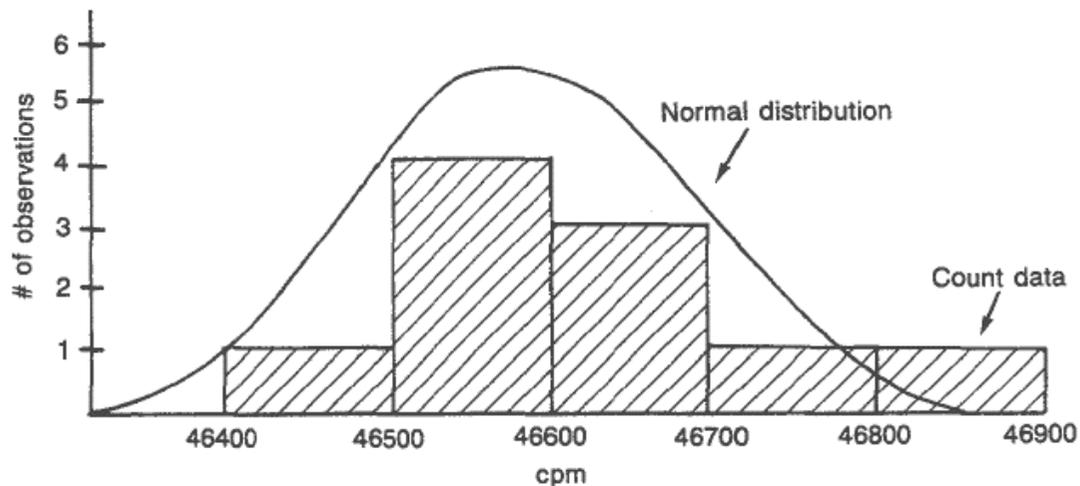


Gambar 10. Perbandingan nilai efisiensi deteksi dan TDCR pada LSC Hidex 300 SL (Casette, 2010).

5. Statistik Pencacah Sintilasi Cair

Statistik dipertimbangkan dalam perhitungan nuklir menggunakan pencacah sintilasi cair karena peluruhan radionuklida pada dasarnya memancarkan partikel beta secara acak. Statistik memungkinkan untuk menggambarkan perilaku rata-rata dari semua peluruhan nuklir dalam sampel. Statistik digunakan untuk menyatakan kemungkinan memperoleh jumlah yang diberikan dalam batas kepercayaan tertentu yang ditentukan. Gambar 11 menunjukkan distribusi normal dan pencacahan data untuk sampel radioaktif (Kessler, 2015).

$$\text{Standar deviasi (s)} = \sqrt{\frac{\text{Sum } (x-\bar{x})^2}{i-1}} \quad (22)$$



Gambar 11. Distribusi normal dan pencacahan data untuk sampel radioaktif yang dilakukan perhitungan sepuluh kali (Kessler, 2015)

6. Penelitian yang Berkaitan dengan Penanggalan Radiokarbon dengan LSC

Teknik penanggalan radiokarbon mengalami perkembangan terus-menerus selama hampir setengah abad keberadaannya. Dimulai dengan pencacah Geiger karbon-padat Libby. Dalam beberapa tahun digantikan oleh pencacah proporsional gas (*gas proportional counter*) detektor tunggal yang kurang sensitif terhadap kontaminasi udara. Perkembangan terakhir pencacah proporsional gas menggunakan banyak detektor/ *multidetector* (Theodorson, 1991).

Accelerator mass spectrometry (AMS) muncul pada akhir tahun 1970-an di Laboratorium Fisika Nuklir. *Accelerator mass spectrometry* adalah metode pencacahan atom yang sangat sensitif yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi kelimpahan isotop alami (kisaran antara 10^{-12} hingga 10^{-16}) dari radionuklida dan nuklida stabil. Kelebihan AMS dibandingkan dengan metode radiometrik konvensional adalah penggunaan sampel yang lebih kecil (0,1 mg) dan waktu pengukuran yang lebih singkat (kurang dari 1

jam). Disisi lain, AMS memiliki kekurangan yaitu harganya relatif lebih mahal. Peralatan yang digunakan untuk AMS didasarkan pada akselerator tandem elektrostatik (Hellborg dan Skog, 2008).

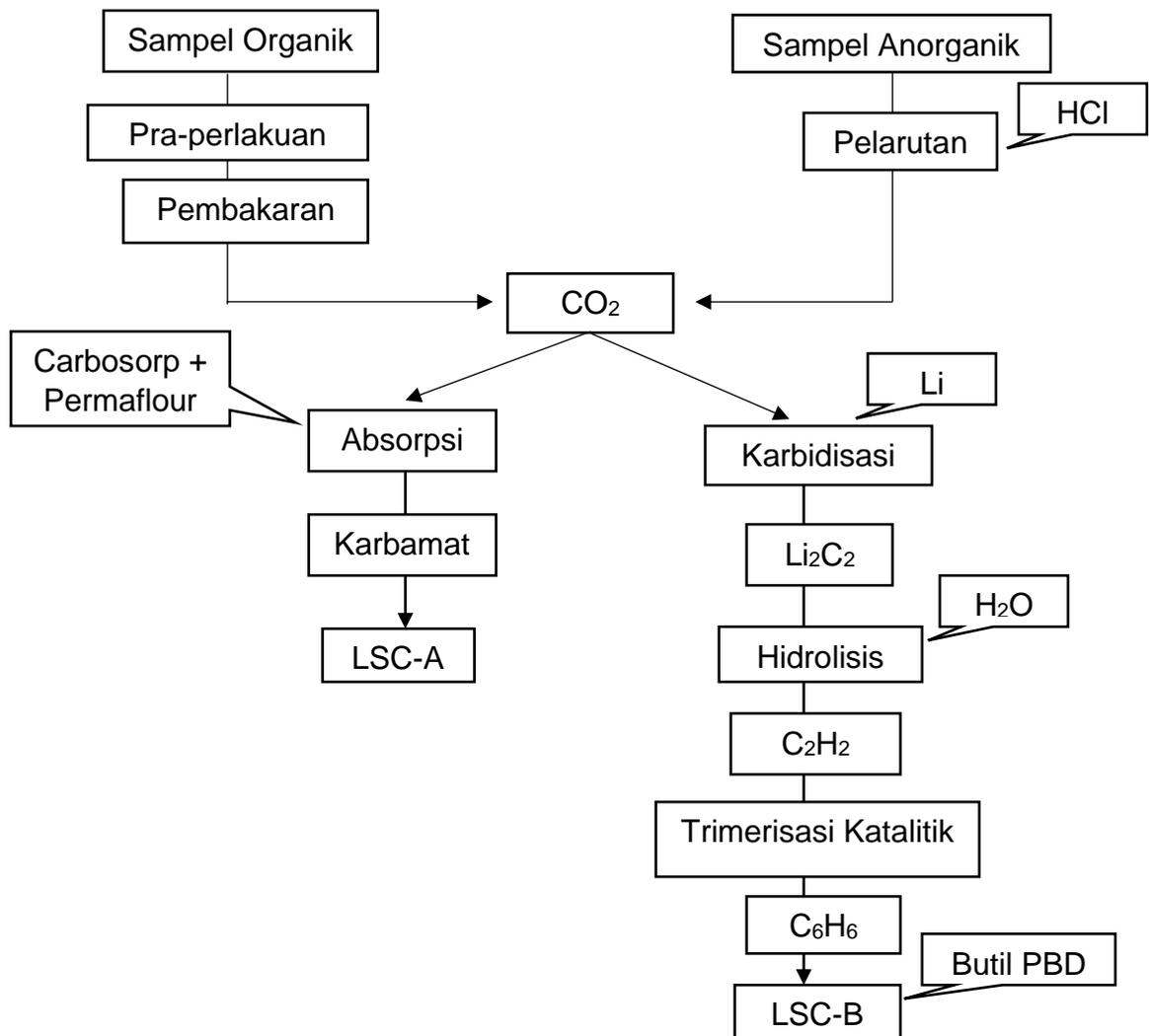
Pencacah sintilasi cair merupakan teknik utama tidak hanya untuk pengukuran radionuklida pemancar beta murni, tetapi juga peluruhan oleh penangkapan elektron (*electron capture*) dan emisi alfa. Keuntungan utama LSC adalah efisiensi pencacahan yang tinggi yang mencapai 100 %, prosedur relatif sederhana untuk persiapan sampel dan fitur untuk mendapatkan spektrum beta sampel. Teknik pengukuran ini masih merupakan metode radiometrik utama dalam penentuan radionuklida pemancar beta, terutama yang memancarkan partikel beta energi rendah dan peluruhan dengan penangkapan elektron (L'Annunziata, 2011). Pada Tabel 4 menunjukkan penelitian yang berkaitan dengan penanggalan radiokarbon menggunakan metode LSC.

Tabel 4. Penelitian yang berkaitan dengan penanggalan radiokarbon menggunakan metode LSC

No	Sampel	Lokasi	Metode Pengukuran	Prakiraan Umur	Peneliti
1	Sedimen	Pulau Lae-Lae	LSC 300 SL	821,0822 tahun	Aprilia dan Zakir, 2014
2	Batu gamping	Leang-leang	LSC 300 SL	25.607,403 ± 919,305 dan 8457,792 ± 921,899 tahun	Syarifuddin dkk., 2014
3	Pohon	Jepang	LSC Quantulus 1220™	2580 - 2520 cal BP	Sakurai dkk., 2006
4	Karang	Pulau Langkai	LSC 300 SL	436,131 ± 159 dan 403,615 ± 74 tahun	Hartoko dkk., 2016
5	Karang	Pulau Lajukkang	LSC 300 SL	669,484 ± 20 tahun	Jauhari dan Maming, 2014
6	Karang	Pulau Panambungan	LSC 300 SL	4955 ± 935 tahun	Salahuddin dkk., 2017
7	Karang	Pulau Barang Lompo	LSC 300 SL	5425.452 tahun	Matande dkk., 2017
8	Karang	Pulau Kayangan	LSC 300 SL	310,49 tahun	Firman dkk., 2018
9	Karang	Pulau Selayar	LSC 300 SL	1971,728 tahun	Amri dkk., 2019
10	Karang	Pulau Panikiang	LSC 300 SL	342,04 ± 37.66 tahun	Arisandi dkk., 2019
11	Karang	Pulau Samalona	LSC 300 SL	130,343 ± 18,4 tahun	Wahyudin dkk., 2019

7. Metode Pra-perlakuan Contoh dalam Analisis Radiokarbon

Pra-perlakuan sampel untuk analisis radiokarbon dengan menggunakan LSC bergantung pada jenis sampelnya. Pra-perlakuan sampel dengan pembakaran untuk sampel organik atau pelarutan sampel karbonat dengan HCl untuk sampel anorganik dan melepaskan CO₂. Gas CO₂ yang dihasilkan dapat diserap melalui 2 metode, absorpsi CO₂ secara langsung (LSC A) atau sintesis benzena (LSC-B) yang terdapat pada Gambar 12 (Obelic, dkk., 2003).



Gambar 12. Prosedur untuk preparasi sampel dan pengukuran di Laboratorium Radiokarbon dan Tritium Zagreb (Obelic dkk., 2003)

Pengukuran ^{14}C menggunakan metode penyerapan langsung mengikuti prinsip yang mirip dengan yang digunakan dalam metode sintesis benzena. Jumlah karbon yang diketahui dari standar sampel atau bahan latar belakang (*background*) dalam bentuk cairan yang selanjutnya dianalisis dengan LSC. Aktivitas partikel beta untuk sampel yang sesuai untuk peluruhan ^{14}C diukur dan dibandingkan dengan latar belakang (*background*) dan standar modern. Fase selanjutnya dalam sintesis benzena adalah konversi CO_2 menjadi benzena dengan beberapa langkah perantara (produksi LiC dan C_2H_2). Dalam metode penyerapan langsung, CO_2 yang dihasilkan diabsorpsi oleh cairan yang mengandung amina tersier (2-metoksietilamin) membentuk karbamat. Pada prosedur ini penting untuk mengetahui jumlah karbon total yang diabsorpsi oleh absorber contohnya 2-metoksietilamin (Varlam dkk., 2007). Selanjutnya, sampel ditambahkan dengan koktail yang sesuai dan dianalisis dengan LSC. Metode ini sederhana, aman, efisien dan biaya analisisnya relatif lebih murah sehingga digunakan untuk preparasi sampel yang dianalisis dengan LSC (Obelic dkk., 2003). Berikut perbandingan penggunaan absorber CO_2 pada Tabel 5:

Tabel 5. Perbandingan penggunaan absorber CO₂

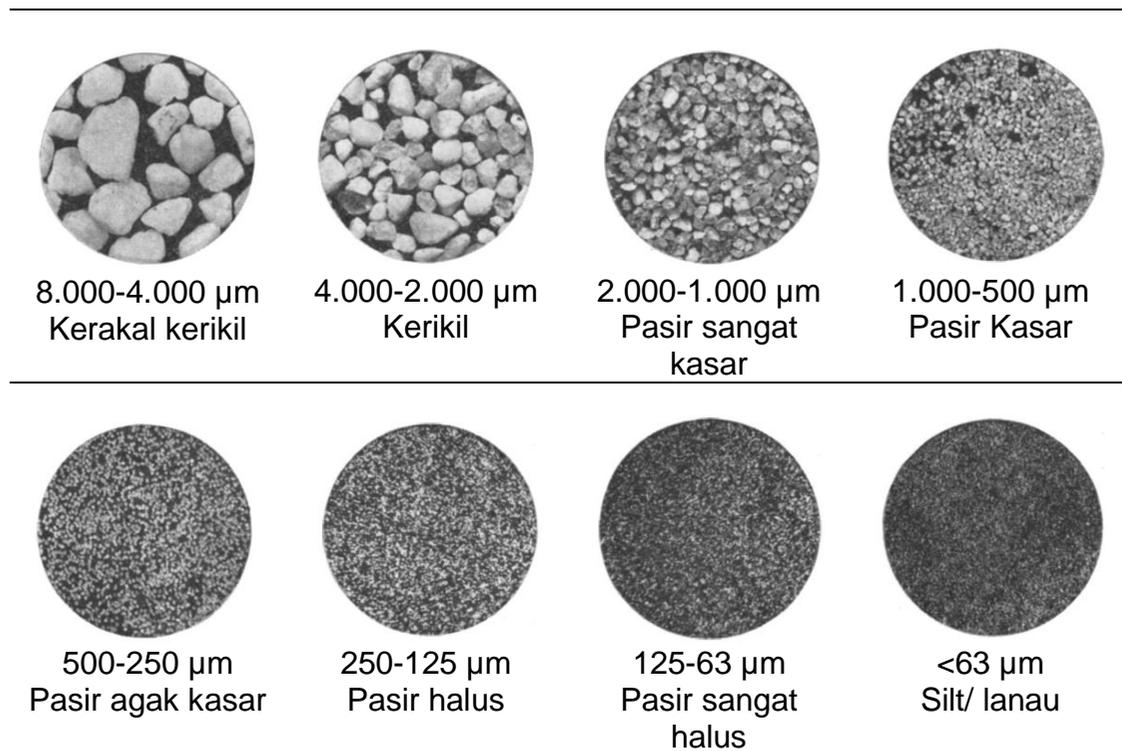
No	Sampel & Lokasi	Absorber CO ₂	TDCR	Peneliti, Tahun
1	Karang di Pulau Langkai	KOH dan NaOH	0,682 dan 0,572	Hartoko dkk., 2016
2	Karang di Pulau Langkai	MEA 30%, DEA 30%, & TEA 30%	0,526; 0,563 dan 0,601	Rahmaniah dkk., 2015
3	Karang di Pulau Langkai	Ammonium hidroksida	0,601	Tenrisa'na dkk., 2015
4	Karang di Pulau Langkai	NaOH	0,5854	Kurniaty dkk., 2015

H. Analisis Tekstur Sedimen

Metode analisis ukuran butir dan jenis sedimen menggunakan metode ayak kering pada saringan bertingkat (*sieve analysis*) serta analisis *granulometri*. Pemisahan ukuran butir sedimen dilakukan dengan saringan berukuran 8000-4000 μm , 4000-2000 μm , 1000-2000 μm , 500-1000 μm , 250-500 μm , 125-250 μm , 63-125 μm dan <63 μm . Klasifikasi ukuran butir (Gambar 13) dilakukan berdasarkan klasifikasi Wentworth (1922). Penentuan jenis sedimen dilakukan berdasarkan klasifikasi Diagram Segitiga Flok dan Ward (1957). Dalam menafsirkan sebaran, mekanisme pengangkutan dan pengendapan sedimen digunakan pendekatan statistik dari masing-masing kelompok sedimen.

Sedimen pada umumnya berupa partikel yang berasal dari cangkang, sisa kerangka organisme maupun pembongkaran bebatuan. Proses erosi ataupun sedimentasi di pantai dapat diketahui berdasarkan informasi sifat sedimen (Ardani dkk., 2020). Studi sebaran jenis sedimen dilakukan untuk

memberikan gambaran proses transportasi dan pengendapan sedimen berdasarkan distribusi ukuran butir sedimen (Gemilang dkk., 2018). Berikut Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan Logaritmik Folk & Ward (1957) dan kategori sortasi, ukuran kesimetrisan, dan kurtosis.



Gambar 13. Klasifikasi ukuran butir sedimen

Tabel 6. Logaritmik Folk dan Ward (1957)

Rata-Rata (Mean)	Standar deviasi (Standard deviation)	Ukuran kesimetrisan (Skewness)	Kurtosis
$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\delta_l = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$	$Sk_l = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - 2\phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$

Tabel 7. Kategori sortasi, ukuran kesimetrisan, dan kurtosis

Sortasi (δ_l)	
Sortasi sangat baik	<0.35
Sortasi baik	0.35-0.50
Sortasi cukup baik	0.50-0.70

Sortasi sedang	0.70-1.00
Sortasi cukup buruk	1.00-2.00
Sortasi buruk	2.00-4.00
Sortasi sangat buruk	>4.00
Ukuran kesimetrisan (<i>Skewness, Sk</i>)	
Sangat condong ke ukuran yang kecil, <i>Very fine skewed</i>	+0.3 to +1.0
Distribusi butiran sedimen ke ukuran yang lebih kecil, <i>Fine skewed</i>	+0.1 to +0.3
Simetris, <i>Symmetrical</i>	+0.1 to -0.1
Condong ke ukuran kasar, <i>Coarse skewed</i>	-0.1 to -0.3
Sangat condong ke ukuran kasar, <i>Very coarse skewed</i>	-0.3 to -1.0
<i>Kurtosis (K_G)</i>	
Sangat Tumpul, <i>Very platykurtic</i>	<0.67
Butiran sedimen tumpul, <i>Platykurtic</i>	0.67-0.90
Butiran sedimen sedang, <i>Mesokurtic</i>	0.90-1.11
Butiran sedimen runcing, <i>Leptokurtic</i>	1.11-1.50
Lebih runcing, <i>Very leptokurtic</i>	1.50-3.00
Sangat runcing, <i>Extremely leptokurtic</i>	>3.00

I. X-ray Fluorescence Spectrometry

X-ray fluorescence spectrometry (XRF) digunakan untuk menentukan komposisi unsur dalam bentuk senyawa oksida sebagai persentase komposisi (Oyedotun, 2016). Spektrometri fluoresensi sinar X energi dispersif (EDXRF) adalah analisis yang tidak merusak, cepat, multielemen, sangat akurat dan ramah lingkungan dibandingkan dengan metode deteksi unsur lainnya. Peralatan EDXRF ini dapat mengukur elemen minor pada material dengan kandungan di bawah 0.03% (Yao dkk., 2015).

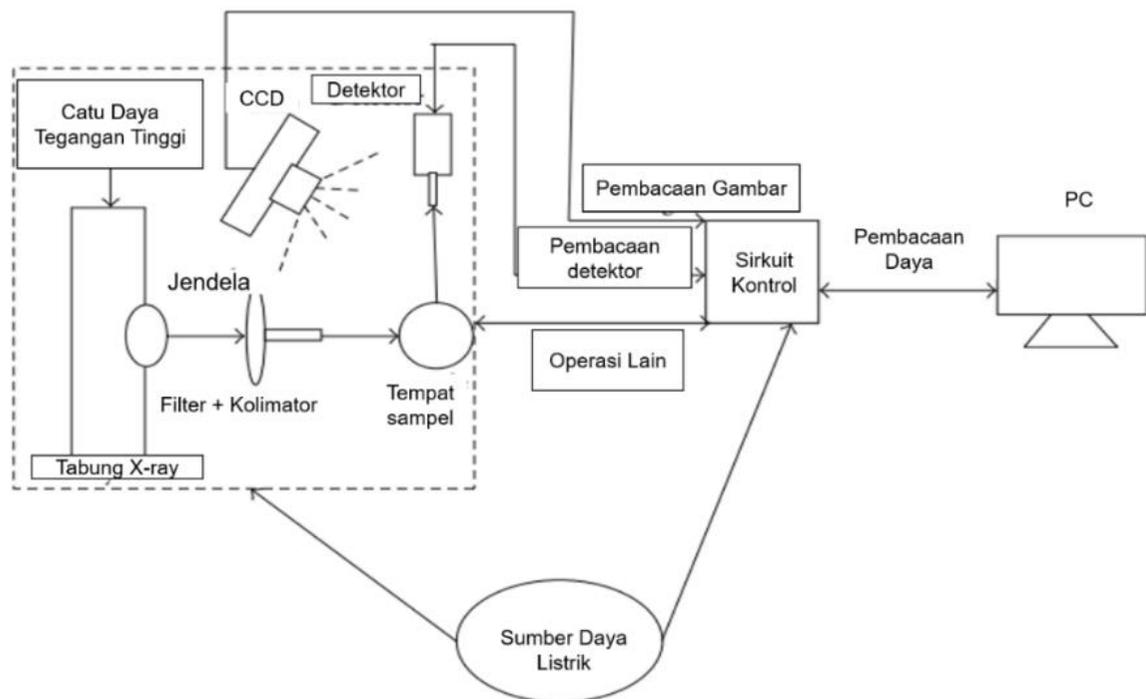
1. Mekanisme Kerja

Alat XRF untuk menganalisis berkas *fluorescent* dan mengukur karakteristiknya dalam energi (Panjang gelombang) dan intensitas. Sinar X yang dihasilkan oleh tabung sinar X (bahan anoda: Rh), dan sinar difilter. Sinar X mengenai bagian bawah spesimen sampel. Elemen dalam sampel akan berfluoresens dengan energi foton sekunder yang keluar dalam sampel. Energi atau Panjang gelombang dari foton fluoresens merupakan indikasi mengenai komposisi elemen dalam sampel. Intensitas dari berkas fluoresens (jumlah foton per detik) adalah indikasi konsentrasi elemen dalam sampel. Selanjutnya, foton akan diteruskan ke detektor Si-PIN yang berfungsi menerima sinyal yang akan dikonversi dan ditampilkan sebagai output (Patty, 2013).

2. Perangkat Keras Spektrometer EDXRF

Spektrometer EDXRF dirancang sesuai dengan hukum Moesley. Sistem diilustrasikan pada Gambar 14. Spektrometer EDXRF terdiri atas catu daya, subsistem jalur cahaya, sirkuit kontrol, dan komputer. Subsistem jalur cahaya meliputi tabung sinar-X, filter, kolimator, detektor, dan kamera CCD (*charge-coupled device*). Subsistem jalur cahaya bertanggung jawab untuk memancarkan, menerima dan menghitung foton XRF. Operasinya yaitu catu daya tegangan tinggi memberikan energi tegangan tinggi ke tabung sinar X yang dirancang untuk memancarkan sinar X primer. Sinar X primer melewati jendela Be, filter dan kolimator, akhirnya menyinari sampel. Selanjutnya, Sinar X sekunder yang dihasilkan sampel diteruskan ke detektor. XRF yang diterima diubah menjadi pulsa tegangan rendah oleh preamplifier.

Amplitudo pulsa yang sangat proporsional dengan energi dari XRF yang diterima selanjutnya diperkuat oleh penguat utama. Konverter analog ke digital kemudian mengubah tegangan yang diperkuat menjadi sinyal digital. Sinyal digital selanjutnya dibentuk, diurutkan, dan diubah menjadi penghitung pulsa dengan informasi amplitudo. Informasi ini disimpan dalam penganalisis multisaluran sesuai dengan amplitudonya dan akhirnya diformat ke garis spektral XRF. Detektor mengirimkan informasi spektral ke PC melalui hub USB di sirkuit kontrol untuk analisis kualitatif dan kuantitatif. (Yao dkk., 2015; Patty, 2013)



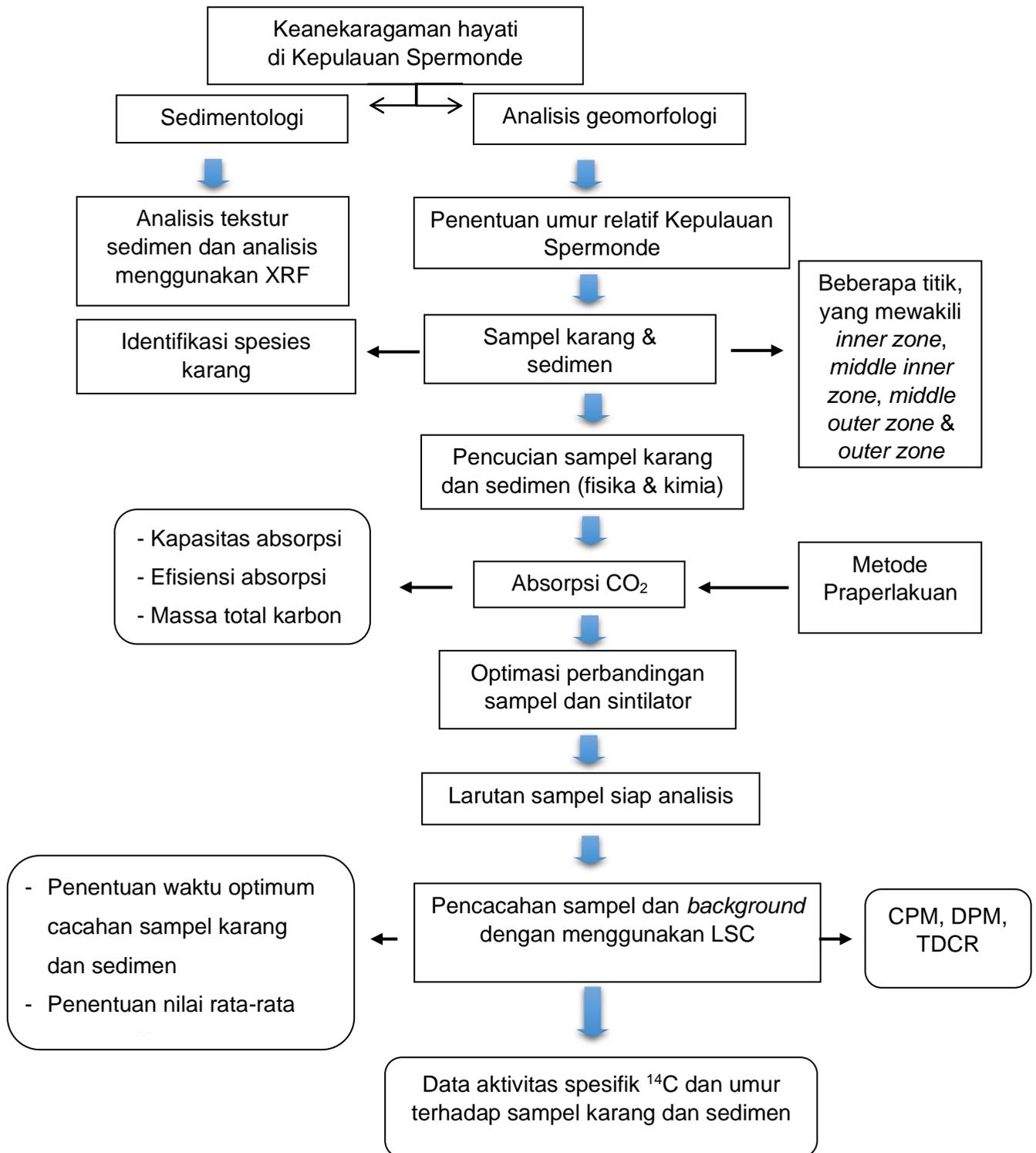
Gambar 14. Diagram struktur spektrometer EDXRF (Yao dkk., 2015)

J. Kerangka Konseptual

Kepulauan Spermonde memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi (spesies karang keras >210 spesies). Hal ini berkaitan dengan sedimentologi

dan geomorfologi dari kepulauan tersebut (Kench dkk., 2017). Analisis Sedimentologi berupa karakteristik fisik dan kimia sedimen. Pada analisis secara geomorfologi, salah satu pendekatan yang dapat dilakukan yaitu mengetahui umur relatif pembentukan Kepulauan Spermonde menggunakan metode penanggalan radiokarbon LSC dengan menggunakan sampel karang dan sedimen pada 12 pulau (tiga pulau di setiap zona) yang mewakili Kepulauan Spermonde.

Metode analisis menggunakan LSC memerlukan pra-perlakuan sebelum dilakukan proses analisis. Metode absorpsi CO_2 digunakan karena memiliki kelebihan yaitu sederhana, aman, efisien dan biaya analisisnya relatif lebih murah (Obelic dkk., 2003). Pada sampel ditambahkan HCl dan menghasilkan gas CO_2 yang kemudian diabsorpsi oleh KOH. Optimasi proses absorpsi dilakukan untuk menentukan kapasitas absorpsi, efisiensi absorpsi dan massa total karbon. Selanjutnya, sampel dan *background* dianalisis dengan LSC Hidex 300 SL (waktu optimum cacahan dan nilai rata-rata aktivitas ^{14}C) untuk mengetahui aktivitas ^{14}C dan umur terhadap sampel karang dan sedimen. Gambar 15 menunjukkan kerangka konseptual penelitian pemetaan umur relatif Kepulauan Spermonde.



Gambar 15. Skema kerangka konseptual

K. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian pustaka, dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

1. pasir kasar memiliki kemungkinan dominasi tertinggi penyusun sedimen di seluruh pulau Kepulauan Spermonde dengan materi bersenyawa karbonat asal terumbu karang sebagai penyusun kimia terbanyak.
2. perbedaan zona Kepulauan Spermonde berpotensi tidak mempengaruhi perbedaan umur relatif.
3. variasi kedalaman pengambilan sampel di Kepulauan Spermonde yang semakin dalam berpotensi memiliki dengan umur relatif yang lebih tua.
4. karang dan sedimen memiliki potensi untuk menjadi indikator untuk mengetahui umur relatif pulau di Kepulauan Spermonde.