

## **Tinjauan Konsep dan Aplikasi Teknologi Geospasial dalam Pemetaan dan Pemodelan Migrasi Hiu Paus (*Rinichodon typus*)**

### **A Review of The Concept and Application of Geospatial Technology in Mapping and Modeling the Migration of Whale Shark (*Rinichodon Typus*)**

**Thomas Frans Pattiasina<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Papua, Indonesia

\* Korespondensi: th.pattiasina@unipa.ac.id

#### **ABSTRAK**

Hiu Paus (*Rinichodon typus*) adalah spesies ikan pelagis dengan ukuran terbesar di dunia dan memiliki jangkauan pergerakan yang sangat luas. Dengan memahami migrasi hiu paus, sejumlah kebijakan penting dapat segera diterapkan untuk melestarikan populasi spesies ini di alam. Tulisan ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum tentang konsep dan aplikasi ilmu dan teknologi spasial untuk memetakan dan memodelkan migrasi spesies hiu paus. Tulisan ini adalah hasil review dari berbagai literatur, baik artikel jurnal ilmiah dan buku-buku yang berkaitan dengan pemetaan dan pemodelan hewan laut umum dan hiu paus pada khususnya. Tulisan ini dimulai dengan deskripsi aspek bioekologis dan ancaman terhadap populasi hiu paus. Lebih lanjut, konsep pemetaan dan pemodelan migrasi hiu paus akan dijelaskan, meliputi faktor-faktor penting dalam pemetaan dan pemodelan, pengembangan model migrasi informasi geografis (SIG) dan penerapan pemodelan migrasi hiu paus. Kesimpulan dari tinjauan ini adalah bahwa karakteristik bioekologis dan pola migrasi hiu paus menyebabkan spesies ini rentan terhadap berbagai ancaman baik dari faktor alam maupun aktivitas manusia. Pemetaan dan pemodelan migrasi umumnya didasarkan pada variasi lingkungan atau faktor oseanografi dan jenis pergerakan spesies. Hasil pemetaan dan pemodelan yang akurat akan sangat bermanfaat dalam perencanaan dan kebijakan mengenai pengelolaan dan konservasi spesies hiu paus.

Kata kunci: Pemetaan; Pemodelan spasial; Migrasi jenis; Oseanografi

#### **ABSTRACT**

The Whale Shark (*Rinichodon typus*) is a species of pelagic fish with the largest size in the world and has a very wide range of movements. By understanding the migration of whale sharks a number of important policies can be immediately applied to preserve the population of this species in nature. This paper aims to provide an overview of the concept and application of spatial science and technology to map and model the migration of whale shark species. This paper is the result of a review of various literatures, both scientific journal articles and books related to mapping and modeling of common marine animals and whale sharks in particular. The paper begins with a description of the bioecological aspects and threats to the whale shark population. Furthermore, the concept of mapping and modeling of whale shark migration will be described, covering important factors in mapping and modeling, development of marine geographic information migration model (GIS) and application of whale shark migration modeling. The conclusion from the review is that bioecological characteristics and patterns of whale shark migration cause these species to be vulnerable to various threats from both natural factors and human activities. Migration mapping and modeling is generally based on environmental variation or oceanographic factors and species movement types. Accurate mapping and modeling results will be of great value in planning and policies regarding the management and conservation of whale shark species.

Keywords: Mapping; Spatial modeling; Species migration; Oceanography

## PENDAHULUAN

Daerah Perlindungan Laut (*Marine Protected Area*) sekarang sedang berkembang secara luas di seluruh dunia dan bertujuan, setidaknya sebagian, untuk membantu melindungi hewan migran di mana mereka bermigrasi untuk berkembang biak atau mencari makan (misalnya Cetacean, Hooker *et al.*, 1999; Hiu, Kinney and Simpfendorfer, 2009; kura-kura laut, Schofield *et al.*, 2013a). Walaupun demikian, dalam beberapa kasus Daerah Perlindungan Laut belum bisa sepenuhnya melindungi hewan-hewan laut yang bermigrasi dalam skala yang luas. Hal ini disebabkan karena spesies migrasi juga berisiko selama migrasi di sepanjang koridor yang menghubungkan habitat berkembang biak dengan habitat mencari makan (Womble and Gende, 2013).

Kegagalan untuk melaksanakan perlindungan terhadap koridor migrasi satwa laut umumnya muncul karena pengetahuan tentang rute migrasi yang terbatas, dukungan logistik dan kapasitas yang terbatas, isu-isu stakeholder dan politik (Womble and Gende, 2013). Kondisi ini semakin parah pada jenis satwa laut yang melintasi hamparan laut terbuka dan jarak migrasi yang sangat panjang (Schofield *et al.*, 2013b). Kesulitan yang terutama adalah mengelola (memonitor dan mengatur) aktivitas manusia yang berpotensi merugikan di areal yang luas (Hooker *et al.*, 2011). Rute migrasi satwa laut seringkali bertabrakan dengan kegiatan lain seperti pelayaran komersial, stasiun energi alami (yaitu angin dan gelombang) dan daerah yang digunakan oleh angkatan bersenjata (misalnya Mullen *et al.*, 2013) atau sumber daya penting perikanan (misalnya Zappes *et al.*, 2013).

Sampai saat ini studi untuk mengidentifikasi koridor utama yang digunakan oleh satwa laut sudah mulai berkembang (Mumby, 2006; Block *et al.*, 2011; Olavo *et al.*, 2011). Manfaat dari studi-studi tersebut adalah untuk memberikan informasi tentang rute migrasi yang menghubungkan habitat yang dilindungi, termasuk daerah terpencil yang sulit dijangkau. Hal ini berpotensi mengurangi risiko kepunahan spesies dengan meningkatkan stabilitas populasi, meningkatkan ukuran populasi, meningkatkan keanekaragaman jenis dan/atau meningkatkan pertukaran genetik (Hilty *et al.*, 2012).

Menurut Sequeira *et al.* (2013), memahami perilaku migrasi hiu paus (*Rhincodon typus*) merupakan inti dari manajemen konservasi spesies ini. Jalur migrasi yang panjang dari habitat reproduksi ke habitat mencari makan (*foraging habitat*) atau sebaliknya, dengan pergerakan yang

relatif lambat dan sebagian besar waktu di permukaan menyebabkan hiu paus sangat rentan terhadap ancaman baik secara alami maupun akibat kegiatan manusia. Dengan memahami migrasi hiu paus berbagai kebijakan penting dapat segera diterapkan untuk menjaga kelestarian populasi hiu paus di alam.

Teknologi geospasial adalah salah satu dari tiga bidang ilmu yang utama saat ini, disamping bioteknologi dan nanoteknologi. Teknologi Geospasial (*Geospatial Technology*), atau biasa dikenal juga dengan *Geomatic* atau Teknologi Informasi Keruangan (*Spatial Information Technology*), merupakan teknologi yang digunakan untuk mengukur, menganalisis dan memvisualisasikan objek-objek atau fenomena yang ada di bumi. Teknologi geospasial mencakup tiga teknologi yang berbeda namun dalam prakteknya kerap dipadukan, yaitu: teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*), sistem informasi geografis (*geographical information system - GIS*) dan teknologi navigasi (*navigation technology*) dimana salah satu sistem yang umum digunakan adalah *Global Positioning System* (GPS) milik Amerika Serikat.

Pemetaan dan pemodelan pergerakan populasi perikanan (misalnya pemijahan atau migrasi untuk makanan) menggunakan teknologi geospasial adalah bentuk aplikasi yang baru berkembang. Walaupun demikian, hasil-hasil penelitian terkait pemetaan dan pemodelan migrasi ikan sejauh ini telah digunakan sebagai dasar untuk menetapkan kebijakan perlindungan atau pengelolaan sumberdaya ikan di berbagai tempat. Aplikasi pemetaan dan pemodelan dengan teknologi geospasial dapat digunakan untuk menggambarkan migrasi hiu paus sebagai dasar untuk menentukan kebijakan pengelolaan dan konservasi populasi spesies ini.

Tulisan ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang konsep dan aplikasi ilmu dan teknologi geospasial untuk memetakan dan memodelkan koridor migrasi spesies hiu paus (*Rhincodon typus*), serta penerapannya dalam mendukung upaya pengelolaan dan konservasi spesies tersebut. Di bagian awal tulisan ini akan digambarkan aspek bioekologi, ancaman-ancaman, serta migrasi dan distribusi populasi hiu paus. Selanjutnya diuraikan konsep pemetaan dan pemodelan migrasi hiu paus, yang mencakup faktor-faktor penting dalam pemetaan dan pemodelan, pengembangan model migrasi satwa laut berbasis sistem informasi geografis dan penerapan pemodelan migrasi hiu paus.

## BIOEKOLOGI HIU PAUS

### Morfologi

Hiu Paus atau *Whale Shark (Rhincodon typus, Smith 1828)* adalah ikan yang terbesar di planet bumi. Panjang total (TL) mencapai 10-12 m, jarang sampai 18 m. Massa tubuh hiu paus bisa mencapai 21.000 kg. Perbandingan panjang dan berat hiu paus dengan jenis hiu lainnya ditampilkan pada Tabel 1. Bagian kepala rata dan lebar dengan tubuh meruncing dari lingkaran bahu yang lebar sampai ke pangkal ekor yang sempit. Mulut besar, melintang dan dekat-terminal. Ikan ini memiliki celah insang yang sangat besar dan gigi banyak tapi kecil. Bentuk mata lateralis dengan spirakel di belakang mata. Sirip punggung pertama jauh lebih besar dari kedua. Sirip ekor semi-bulan sabit. Tanda-tanda tubuh yang unik, terdiri dari pola kotak-kotak dari bintik-bintik cahaya, garis-garis horizontal dan garis vertikal dengan latar belakang yang gelap (Stewart and Wilson, 2005). Warna hiu paus mulai dari biru-abu-abu ke abu-abu-coklat, dengan 'kotak-kotak' pola garis dan bintik-bintik pada dorsal dan permukaan lateral. Permukaan ventral dari hiu ini biasanya memiliki pewarnaan cahaya putih (Norman, 2002).

Tabel 1. Perbandingan Panjang dan Berat Hiu Paus dengan Beberapa Jenis Hiu Lain  
(Sumber: www.discovery.com)

Jenis	Panjang (m)	Berat (kg)
Basking shark	10	14.500
Blacktip reef shark	1,60	13,6
Dwarf lanternfish shark	0,19	0,014
Great white shark	7	2.270
Mako shark	3,9	450
Megamouth shark	5,5	1.215
Nurse shark	4,3	330
Whale shark	14	21.000

### Habitat

Hiu paus bersifat epipelagik dan neritik, hidup di habitat laut dan pesisir, di wilayah tropis dan yang suhunya hangat. Hiu paus sering terlihat jauh di lepas pantai tapi secara teratur datang perairan dekat pantai dan terumbu karang serta kadang-kadang memasuki laguna atol karang. Di wilayah Pasifik barat tampaknya hiu paus lebih memilih daerah di mana suhu permukaan 21°C hingga 25°C dengan air dingin dari 17°C atau kurang dan salinitas 34,0-34,5 ppt (Compagno, 2001).

Penandaan Satelit oleh Eckert and Stewart (1996) di Teluk California menunjukkan bahwa hiu lebih suka suhu air lebih dari 26°C dan sampai 34°C, meskipun tercatat beruaya dalam massa air pada suhu sampai 10°C; hiu cenderung untuk bergerak keluar dari bagian dari Teluk California di mana air permukaan didinginkan di bawah 26°C dengan upwelling. Kondisi ini mungkin optimal untuk produksi plankton dan organisme kecil untuk nektonic berukuran sedang, yang semuanya adalah mangsa dari hiu paus.

Hiu paus umumnya dilihat atau ditemui dekat dengan atau pada permukaan di perairan hangat, meskipun penandaan satelit baru-baru ini di Laut Karibia off Belize menunjukkan bahwa hiu paus dapat menyelam hingga kedalaman 700 m dan dapat transit di dalam air dingin turun menjadi 7,8°C (R. Graham, pers.comm *dalam* Compagno, 2001). Di Ningaloo Reef di Australia Barat hiu *sonic-tagged* sering menyelam selama dua jam 18 lagu dan berkisar dari permukaan ke dekat bagian bawah pada kedalaman 40 sampai 70 m dengan salinitas di 34,9-35,2 ppt dan suhu 26,8-27,5°C pada permukaan sampai 26,4-25,4°C di bagian dasar.

## **Reproduksi**

Reproduksi ikan hiu paus adalah ovovivipar, dimana dalam proses reproduksi, telur dipertahankan sampai embrio menetas. Satu hiu yang ditangkap di perairan Taiwan memiliki 300 embrio dalam rahim dalam berbagai tahap perkembangan. Informasi durasi kehamilan ikan hiu paus hingga saat ini belum diketahui. Pada saat lahir panjang ikan muda sekitar 55-60 cm dan berat 1 kg, dan ketika berumur 4 bulan bisa mencapai panjang hingga 1,4 m dan berat 20 kg. Masa ketertarikan seksual antara jantan dan betina serta waktu kawin belum pernah diamati. Kematangan seksual diperkirakan pada ukuran panjang 6 m (Stewart and Wilson, 2005). Hal yang berlainan disampaikan oleh Colman (1997) bahwa bukti-bukti yang tersedia menunjukkan bahwa ukuran kematangan seksual baik jantan dan betina pada ukuran 9 m. Berdasarkan data yang diperoleh dari pengamatan bawah air di Western Australia, Norman and Stevens (2007) menyampaikan bahwa panjang pertama kali matang seksual untuk jantan sekitar 8 m (TL) dan 95 % dari jantan mencapai matang seksual pada ukuran panjang total (TL) sekitar 9 m. Informasi tambahan disampaikan oleh Chang *et al.*, (1997) bahwa ukuran panjang telur rata-rata 21,1 cm dan lebar 20,1 cm, sedangkan panjang total (TL) embrio rata-rata 51,1 cm dan berat rata-rata 660,2 gram.

## Makanan dan Cara Makan

Colman (1997), mengemukakan bahwa hiu paus adalah hewan *filter-feeder* yang memakan berbagai planktonik dan organisme nektonik. Hiu paus diketahui muncul dari terumbu karang saat terjadi *blooming* organisme planktonik dan pemijahan karang. Krustasea kecil (termasuk copepoda) dalam jumlah besar dilaporkan sebagai makanan, bersama dengan ikan kecil seperti sarden, teri, mackerel, dan bahkan tuna kecil dan albacore serta cumi-cumi. Selanjutnya dikemukakan pula oleh Colman (1997), bahwa hiu paus dapat bergabung bersama dengan tuna dalam hubungan dengan pemijahan *lantern fish* (*Diaphus* dan *Myctophidae*) di Laut Coral Queensland; dan Pulau Christmas di Samudera Hindia bagian timur antara Jawa dan Australia Barat dalam hubungannya dengan pemijahan massal kepiting merah (*Geocarcoidea natalis*).

Ikan hiu paus makan dengan tiga cara yang berbeda (Nelson and Eckert, 2007; Mota *et al.*, 2010), yaitu:

- 1) *Surface and subsurface passive feeding*, yaitu berenang di dan bawah permukaan air sambil menyaring air.
- 2) *Surface and subsurface ram filter/active feeding*, yaitu berenang di permukaan air dan di bawah permukaan air sambil menyedot air.
- 3) *Stationary/vertical suction feeding*, yaitu diam di tempat dalam posisi tegak secara vertikal sambil menyedot air.

Nelson and Eckert (2007), berdasarkan hasil penelitiannya di Bahia de Los Angeles, Baja California Norte, Mexico mengemukakan bahwa kelimpahan zooplankton berbeda secara signifikan antara tiga perilaku makan, dan menunjukkan bahwa kelimpahan mangsa dapat mempengaruhi teknik makan yang diterapkan. Kegiatan makan tidak berlangsung, ketika kepadatan minimal zooplankton kurang dari  $\sim 10.0 \times 10^3$  individu/m<sup>3</sup>. Hiu paus dapat mengikuti isyarat oseanografi (fisik dan biologis) baik di dalam teluk serta seluruh Teluk California yang menguntungkan bagi peningkatan mangsanya.

Berdasarkan hasil penelitian di Semenanjung Yucatan, Mexico, Mota *et al.* (2010) menguraikan bahwa hiu paus rata-rata menghabiskan sekitar 7,5 jam/hari untuk makan di permukaan pada kondisi plankton padat dan didominasi oleh sergestids, copepoda calanoid, chaetognath dan larva sandfish. Berdasarkan pada perhitungan kecepatan aliran bukaan mulut bawah air, diperkirakan bahwa hiu paus dengan panjang total (TL) 443 cm menyaring 326 m<sup>3</sup>/jam, dan yang berukuran panjang total (TL) 622 cm menyaring sebanyak 614 m<sup>3</sup>/jam. Dengan

biomassa plankton rata-rata 4,5 g/m<sup>3</sup> di lokasi makan, dua ukuran hiu rata-rata akan menelan 1.467 dan 2.763 g plankton per jam, dan ransum harian mereka akan masing-masing menjadi sekitar 14.931 dan 28.121 kJ. Nilai-nilai ini konsisten dengan jatah makan independen yang berasal dari penangkaran, hiu paus yang tumbuh di akuarium. Mekanisme makan memanfaatkan filtrasi *cross-flow* dari plankton, yang memungkinkan hiu menelan plankton yang lebih kecil dari mesh sekaligus mengurangi penyumbatan aparatus filter.

Meekan *et al.* (2009) melakukan uji genetik dari feses (kotoran) hiu paus di Pulau Christmas, Australia untuk mengetahui mangsa yang dimakan hiu paus. Hasil uji menunjukkan bahwa makanan yang dominan adalah larva kepiting Pulau Merah (*Gecarcoidea natalis*). Hasil penelitian menunjukkan pula bahwa agregasi hiu paus di perairan pesisir merupakan respon dari peningkatan mangsa planktonik. Clark and Nelson (1997) telah mengamati tujuh hiu paus kecil (panjang total 3,2 - 5,2 m) yang makan dengan cara menyedot plankton permukaan di Teluk La Paz yang berjarak 1 km dari pantai dan 2 km sebelah Utara dari dermaga Phosphate di San Juan de la Costa. Berdasarkan pengamatan tersebut ditemukan bahwa ketika aktif makan hiu berbalik kepalanya dari sisi ke sisi, bagian kepala terangkat keluar dari air, dan mulut dibuka dan ditutup 7-28 kali per menit. Penyedotan tersebut disinkronkan dengan pembukaan dan penutupan celah insang. Perilaku makan ini terjadi hanya di 10 sampai 30 cm di lapisan permukaan yang mengandung konsentrasi besar copepoda, dimana 95% di antaranya diidentifikasi sebagai *Acartia Clausi*.

## ANCAMAN BAGI KELESTARIAN HIU PAUS

### Ancaman Predator dan Faktor Alam

Bukti pemangsa terhadap juvenile hiu paus dikemukakan oleh Kukuyev (1996) yang menemukan juvenile sepanjang 55,7 cm dari dalam perut hiu biru (*Blue Shark, Prionace glauca*) di wilayah tropis Atlantik. Juvenil lain ditemukan hidup di dalam perut *Blue Marlin (Makaira nigricans)* yang ditangkap di perairan Mauritius (Colman, 1997). O'Sullivan (2000) merekam pemangsa terhadap hiu dewasa dengan panjang sekitar 8 m oleh dua paus pembunuh (*Killer Whales, Orcinus orca*) di Teluk California (*Gulf of California*). Selain itu Fitzpatrick *et al.*, (2006) juga telah mengamati hiu paus yang diserang oleh hiu besar, kemungkinan hiu putih (*White Shark, Carcharodon carcharias*). Beckley *et al.* (1997) menemukan sebanyak 36 kasus

hiu yang terdampar di pantai selatan Afrika antara tahun 1984 sampai 1995. Diduga penyebabnya adalah kondisi topografi pantai, arus dan gelombang laut yang kencang.

### **Ancaman dari Kegiatan Manusia**

Menurut Stewart and Wilson (2005), meskipun larangan perburuan hiu paus sudah diterapkan di beberapa negara seperti Filipina (dilarang pada tahun 1998), Indonesia, Maladewa (dilarang pada tahun 1995), India (dilarang pada tahun 2001) dan Pakistan, namun penegakan fungsional secara efektif masih minimal di sebagian besar daerah ruaya. Perburuan dan perdagangan sebagian besar didorong oleh permintaan daging untuk konsumsi lokal dan sirip untuk perdagangan sirip hiu di pasar Asia.

Menurut Norman (2002), produk yang diperdagangkan berasal dari hiu paus termasuk sirip, hati (liver oil), rahang, daging (segar, beku atau asin untuk konsumsi manusia), lambung dan usus (untuk makanan), kartilago (digunakan dalam suplemen kesehatan), dan kulit (untuk produk kulit). Sementara daging olahan, minyak dan tulang rawan hampir mustahil untuk diidentifikasi tanpa melakukan tes DNA di laboratorium. Rahang sirip dan set sirip dapat diidentifikasi lebih mudah, terutama di mana diperdagangkan utuh atau hanya sebagian diproses. Sirip hiu adalah salah satu produk perikanan yang paling mahal di dunia. Sirip hiu diproses untuk menghasilkan jarum sirip hiu, produk agar-agar hambar digunakan dengan bahan-bahan lain untuk menyajikan sup sirip ikan hiu, khususnya di pasar Asia. Hampir setiap spesies hiu memiliki sirip bernilai komersial. Namun, nilai ini tergantung pada faktor-faktor seperti warna, ukuran, ketebalan dan konten jarum sirip.

Disamping ancaman predator dan ancaman dari kegiatan manusia, ancaman lain disebabkan juga oleh kerusakan dan penghancuran habitat daerah makan musiman. Menurut Stewart and Wilson (2005), kerusakan habitat mencari makan seperti terumbu karang oleh eksploitasi langsung dari sumber biotik dan abiotik, pemutihan karang dan perubahan iklim yang cepat, dapat mengancam eksistensi dari hiu paus.

## MIGRASI, DISTRIBUSI DAN STATUS POPULASI HIU PAUS

### Pergerakan Migrasi Hiu Paus

Sampai saat ini tidak diketahui dengan pasti sampai tingkat mana populasi hiu paus di dunia terfragmentasi. Namun yang pasti hiu paus adalah spesies ikan yang beruaya sangat luas. Pergerakan migrasi sekitar 1.000 km selama periode minggu atau bulan telah direkam melalui pelacakan satelit di Pasifik timur dan Asia Tenggara. Satu hiu *satelit-tag* di Laut Mindanao di Filipina dalam perjalanan lebih dari 3.000 km ke ZEE dari Vietnam dalam dua bulan (pers. Comm. Dari S. Eckert, Hubbs-Sea World Research Institute, San Diego, California 1998 *dalam* CITES Amandements). Hiu paus lain ditandai di pantai Sabah di Malaysia, menuju lepas pantai dan kemudian kembali ke perairan Malaysia pesisir lebih kurang 2.152 km dengan rute (pers. comm. dari S. Eckert, 1998 *dalam* CITES Amandements, 2000). Beberapa hiu yang ditandai di Teluk California, Meksiko bergerak lebih dari 12.000 km sebelah barat daya ke perairan internasional dan perairan lepas pantai negara Pasifik Selatan (pers. Comm. Dari S. Eckert, 1998 *dalam* CITES Amandements, 2000).

Migrasi hiu paus umumnya mengikuti komponen musiman dimana agregasi hiu paus muncul di perairan pantai tertentu dan dapat tetap selama beberapa bulan. Hal ini tidak diketahui apakah semua komponen dari populasi (dewasa, remaja, jantan, betina) mengalami migrasi ini, tetapi jelas bahwa hiu paus bermigrasi meliputi wilayah oleh dua negara atau lebih. Terkait migrasi dan status populasi dari spesies ini, ada dugaan bahwa hiu paus secara global merupakan satu populasi besar.

### Populasi Hiu Paus di Dunia

Schmidt *et al.* (2009) melakukan perekaman pertama lokus mikrosatelit pada hiu paus, dimana analisis lokus ini mewakili tiga bagian utama dari jangkauan ruaya mereka yaitu Lautan Pasifik (P), Lautan Karibia (C), dan Lautan India (I) G. Hasil analisis menunjukkan bahwa ada sedikit perbedaan populasi antara hewan sampel dari wilayah geografis yang berbeda, yang menunjukkan aliran gen historis antara populasi. Berdasarkan hasil analisis disimpulkan bahwa tingkat diferensiasi genetik rendah antara populasi hiu paus dari geografis yang berbeda, yang ditunjukkan dengan nilai FST yang sangat kecil (Tabel 2). Dalam penelitian tersebut, digunakan juga data pelacakan satelit untuk mengungkap migrasi baik regional maupun jangka panjang dari

hiu paus di seluruh jangkauan ruaya mereka, yang mendukung temuan aliran gen antara populasi. Hiu paus melintasi batas-batas geografis dan politik selama sejarah hidup mereka dan kawin silang dengan hewan dari populasi yang jauh. Oleh karena itu upaya konservasi harus bisa segera menargetkan perlindungan internasional untuk spesies ini.

Tabel 2. Matriks FST Untuk Populasi Hiu Paus di Tiga Lokasi Berbeda  
(Sumber: Schimidt *et al.*, 2009)

	<b>Pasifik</b>	<b>Karibia</b>	<b>Hindia</b>
<b>Pasifik</b>	0	0,0387	-0,0022
<b>Karibia</b>	0,0569	0	0,0296
<b>Hindia</b>	0,5028	0,0495	0

Sebagai tambahan informasi, Alam *et al.* (2010) melaporkan urutan lengkap pertama dari genom mitokondria (mitogenome) dari hiu paus diperoleh dengan metode sekuensing generasi berikutnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa komposisi nukleotida, jumlah dan susunan gen dalam mitogenome hiu paus adalah sama seperti yang ditemukan di mitogenome anggota lain dari ordo Orectolobiformes dan ordo terdekatnya Lamniformes dan Carcharhiniformes, meskipun hiu paus mitogenome memiliki wilayah kontrol yang sedikit lebih panjang. Selanjutnya dikemukakan bahwa ketersediaan urutan mitogenome (*mitogenome sequence*) hiu paus akan membantu studi sistematika molekuler, biogeografi, diferensiasi genetik, dan genetika konservasi spesies ini.

Berdasarkan hasil penelitian secara genetik tersebut di atas, maka Sequeira *et al.* (2013) menyusun data yang tersedia pada penampakan, pelacakan pergerakan dan distribusi informasi untuk membuktikan hipotesis konektivitas berskala luas di antara populasi hiu paus. Selain itu untuk menghasilkan sebuah model yang menggambarkan bagaimana *Rhincodon typus* merupakan bagian dari satu meta-populasi global. Model konseptual digunakan untuk memvalidasi data yang memberikan dukungan bagi hipotesis bahwa *R. typus* mampu bergerak di antara tiga cekungan laut terbesar dengan total waktu perjalanan minimal sekitar 2-4 tahun. Model ini memberikan perspektif seluruh dunia tentang kemungkinan rute migrasi *R. typus*, dan menunjukkan fokus modifikasi untuk penelitian tambahan dalam menguji prediksi tersebut.

Walaupun Sequeira *et al.* (2013) telah sampai pada kesimpulan bahwa hiu paus di dunia merupakan bagian dari satu meta-populasi global dengan analisis data spasial penampakan dan migrasi namun penelitian terkini oleh Vignaud *et al.* (2014) menunjukkan hasil yang bertolak belakang. Vignaud dan kawan-kawan melakukan penelitian terbaru tentang struktur genetika populasi di antara cekungan-cekungan samudera. Mereka menyajikan bukti genetik bahwa hiu paus, *Rhincodon typus*, terdiri dari setidaknya dua populasi yang jarang bercampur dan merupakan spesies yang pertama mendokumentasikan ekspansi populasi. Struktur genetik yang relatif tinggi ditemukan ketika membandingkan hiu dari Teluk Meksiko dengan hiu dari Indo-Pasifik. Sekalipun pencampuran terjadi antara Samudera Hindia dan Samudra Atlantik, hal itu tidak cukup untuk melawan penyimpangan genetik. Hal ini menunjukkan bahwa tidak semua hiu paus merupakan bagian dari meta-populasi global tunggal. Ekspansi populasi yang signifikan yang ditunjukkan oleh mikrosatelit dan DNA mitokondria. Ekspansi tersebut mungkin terjadi selama masa Holosen, ketika spesies tropis bisa memperluas jangkauan mereka karena kenaikan permukaan air laut menghilangkan hambatan pemisah.

### **Penurunan Populasi Hiu Paus**

Hasil penelitian struktur genetika populasi oleh Vignaud dan kawan-kawan tersebut juga menunjukkan tren bersejarah peningkatan populasi kemungkinan telah dibalikan saat ini. Penurunan keanekaragaman genetik ditemukan selama 6 tahun berturut-turut di Ningaloo Reef di Australia. Penurunan dalam keragaman genetik yang terlihat sekarang adalah mungkin karena panen skala komersial hiu paus dan tabrakan dengan kapal dalam beberapa dekade terakhir di negara-negara lain di Indo-Pasifik. Perburuan hiu paus dilarang di Australia, tetapi terus berlangsung meskipun ada larangan di tempat-tempat seperti China. Temuan studi memiliki implikasi untuk model konektivitas populasi hiu paus dan arahan untuk terus fokus pada perlindungan yang efektif dari ikan terbesar dunia pada berbagai skala spasial.

Hasil penelitian Vignaud dan kawan-kawan di atas mendukung hasil penelitian yang pernah dilakukan oleh Bradshaw *et al.* (2008). Bradshaw dan kawan-kawan menggunakan data dalam jangka panjang (4.436 penampakan) dari agregasi besar (300-500 individu) dari hiu paus di Ningaloo Reef, Australia Barat menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan berarti panjang hiu secara linear sebesar hampir 2,0 m and kelimpahan relatif diukur dari penampakan ekowisata telah menurun sekitar 40% selama dekade terakhir. Hasil tingkat populasi ini menegaskan

prediksi sebelumnya tentang penurunan populasi berdasarkan model proyeksi. Sebagian besar perubahan ini didorong oleh penurunan jumlah individu yang besar dalam populasi. Pengurangan ini bisa terjadi meskipun perlindungan total hiu paus di perairan Australia, karena sebagai spesies hiu paus yang beruaya jauh, kegiatan penangkapan ikan yang berlebihan bisa terjadi di tempat lain. Dengan demikian, konservasi yang efektif dari hiu paus akan membutuhkan perlindungan internasional, dan studi penandaan secara kolaboratif perlu dilakukan untuk mengidentifikasi dan memantau jalur migrasi.

## KONSEP PEMETAAN DAN PEMODELAN MIGRASI SATWA LAUT

### Pentingnya Data dan Informasi Migrasi Satwa Laut

Saat ini penutupan area dalam bentuk Daerah Perlindungan Laut (*Marine Protected Area*) sudah diimplementasikan di berbagai tempat untuk mengontrol penggunaan sumberdaya perikanan di suatu daerah. Walaupun demikian, belum ada kepastian apakah penutupan area tersebut bisa memberikan efek positif pada peningkatan stok perikanan di laut, apalagi untuk spesies-spesies ikan yang memiliki ruaya yang sangat jauh. Implementasi penutupan area sebagai alternatif manajemen sumberdaya perikanan masih kontroversial. Ada pendapat yang menyatakan bahwa pada umumnya jenis ikan komersial terlalu mobile, sehingga penutupan hanya cocok kasus yang khusus, biasanya untuk perikanan skala kecil (Gell and Roberts, 2003). Die and Watson (1992) dan Crowder *et al.* (2000) memprediksikan bahwa penutupan area bisa memberikan dampak negatif jika salah dalam penentuan lokasi. Stockhausen *et al.* (2000) menyatakan bahwa walaupun area yang ditutup sangat luas, tapi tidak tepat dalam penetapannya, justru akan menyebabkan dampak terhadap keamanan stok ikan.

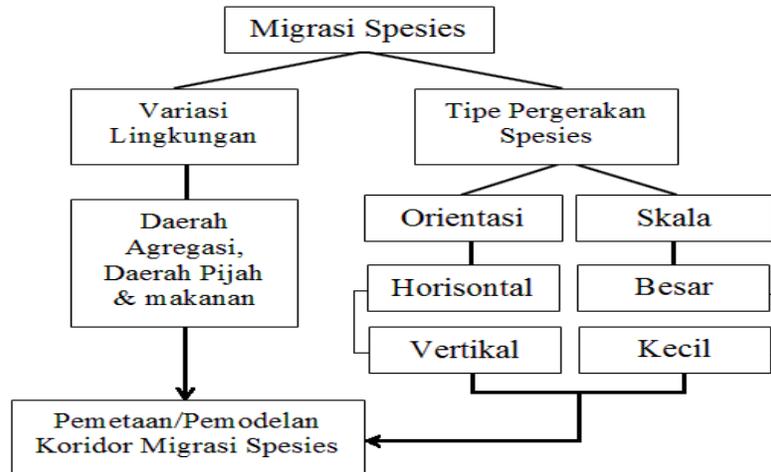
Hasil simulasi model oleh Simons *et al.* (2014) menunjukkan bahwa penutupan area yang meliputi tidak hanya daerah pemijahan tapi juga bagian dari rute migrasi spesies antara daerah pemijahan dan daerah makan paling efektif dalam melindungi biomassa stok pemijahan (*Spawning stock biomass-SSB*). Penutupan yang meliputi rute migrasi spesies ikan akan memungkinkan ikan untuk tetap berada pada daerah yang ditutup sepanjang masa pemijahan dan migrasi ke daerah makan. Penutupan seperti ini memberikan perlindungan hampir sepanjang tahun dan hasilnya berupa menurunnya kematian karena penangkapan (*fishing mortality*) dan peningkatan biomassa stok pemijahan (SSB) sampai 31 %. Di sisi lain, penutupan yang hanya

mencakup sebagian saja dari rute migrasi ikan, walaupun dilakukan sepanjang tahun tidak memberikan efek yang berarti bagi penurunan kematian karena penangkapan (*fishing mortality*). Jadi kesimpulannya lokasi, durasi dan ukuran area yang ditutup sangat berdampak pada kesuksesan perlindungan dari stok ikan.

Jika suatu area yang ditutup didasarkan pada pertimbangan ukuran, durasi dan lokasi sesuai dengan migrasi musiman spesies, maka akan sangat sesuai untuk spesies mobile. Norse (2003) menyatakan bahwa spesies dengan jangkauan migrasi yang jauh seperti tuna dan hiu bisa diuntungkan dengan adanya penutupan area secara temporal, terutama jika area yang ditutup tersebut ditetapkan pada area-area dimana sangat rentan untuk ikan-ikan tersebut, seperti daerah pemijahan, daerah asuhan dan gunung-gunung bawah laut (*sea mounts*). Lebih jauh Hilborn and Walters (1992) menyatakan bahwa penutupan area secara temporal, jika diatur dengan baik akan menjamin perlindungan pada periode rentan dari kehidupan spesies ikan. Keberhasilan penutupan area untuk melindungi stok ikan sangat tergantung dari para ahli perikanan dan pengelola sumberdaya perikanan, terutama dalam menggali dan memanfaatkan informasi tentang daerah pemijahan dan asuhan dari spesies-spesies ikan yang terancam punah. Penutupan area akan berhasil jika didukung dengan data dan informasi dari hasil monitoring distribusi spasial dari populasi untuk memastikan bahwa area yang ditutup telah memenuhi porsi penting dan mendasar dari populasi.

### **Faktor-faktor Penting dalam Pemetaan dan Pemodelan Migrasi Satwa Laut**

Tipe gerakan (horizontal atau vertikal) dan yang skala (kecil atau besar) merupakan faktor penting dalam pemetaan koridor migrasi spesies (Schneider, 1998). Faktor penting lain, khususnya terkait dengan pemijahan atau makan migrasi spesies pelagis, adalah variasi lingkungan antara daerah agregasi dan daerah pemijahan atau daerah makanan. Variasi ini dapat diintegrasikan dalam pemodelan migrasi GIS seperti yang disajikan pada gambar berikut. Dengan mengintegrasikan data variasi lingkungan dan tipe pergerakan spesies ikan maka koridor migrasi ikan dapat dipetakan dan dimodelkan. Gambar 1 berikut ini menggambarkan alur penggunaan data-data variasi lingkungan dan tipe pergerakan spesies ikan dalam pemetaan dan pemodelan koridor migrasi spesies di perairan laut.

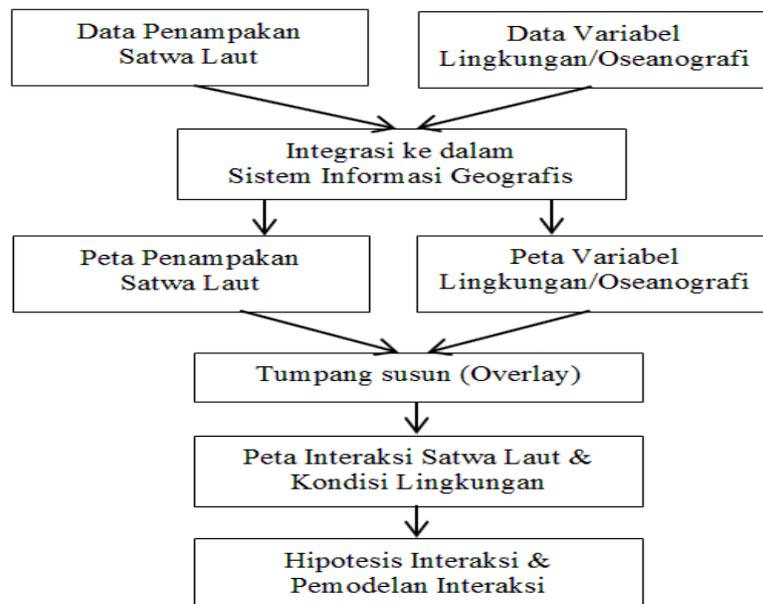


Gambar 1. Integrasi Variasi Lingkungan dan Tipe Pergerakan dalam Pemetaan/Pemodelan Koridor Migrasi Spesies

Contoh penelitian migrasi ikan yang pernah dilakukan di masa lampau dengan memadukan faktor variasi lingkungan dan tipe pergerakan spesies misalnya yellowtail dan mackerel (Saitoh, 1983) dan cumi-cumi Rowell *et al.* (1985). Penelitian Saitoh (1983) dilakukan sepanjang kepulauan Jepang menggunakan alat bantu akustik (untuk kelimpahan relatif sarden dan konsentrasi klorofil), citra satelit (SST), foto udara (identifikasi gerombolan sarden berdasarkan bentuk dan warna) dan data penangkapan komersial. Hasil penelitian adalah berupa model migrasi yang menunjukkan bahwa spesies memanfaatkan alur hangat atau dingin dari daerah transisi dari Kuroshio dan Arus Oyashio selama migrasi makan mereka di perairan pantai. Penelitian lain dilakukan oleh Rowell *et al.* (1985) yang menunjukkan beberapa komponen spasial populasi cumi-cumi di Atlantic bagian barat. Mereka menggunakan tangkapan komersial dan suhu permukaan laut untuk menunjukkan bagaimana pengaruh arus teluk terhadap distribusi larva dan juvenile cumi serta pola migrasi mereka dari Tanjung Hatteras ke daerah Newfoundland. Studi sejenis juga dilakukan oleh Waluda *et al.* (2001) yang menggabungkan atau tumpang susun (*overlay*) antara data tangkapan spesies cumi-cumi sirip pendek *Illex argentinus* dan SST daerah *front* suhu permukaan laut di daerah penangkapan ikan Barat Daya Atlantic (Kepulauan Falkland/Islands Malvinas). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa distribusi geografis spesies sangat berhubungan dengan *front* suhu permukaan laut.

## Pengembangan Model Migrasi Satwa Laut Berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG)

Pergerakan satwa-satwa laut yang besar dapat juga digunakan untuk memodelkan pola migrasi dan menentukan koridor migrasinya. Pada tahun 1995, Science Branch of the Fisheries and Oceans, Canada mengembangkan aplikasi berbasis sistem informasi geografis (SIG) dengan data perikanan dan lingkungan untuk pengelolaan perikanan terpadu di wilayah Newfoundland. Proyek percontohan ini mengintegrasikan penampakan satwa laut dengan beberapa variabel lingkungan (suhu, distribusi es, batimetri, dan lain-lain) ke dalam SIG (Gambar 2).



Gambar 2. Data dan Metode Pemodelan Migrasi Satwa Laut (Sumber: Science Branch of the Fisheries and Oceans, Canada)

Peta-peta yang dihasilkan memberikan gambaran visual dari distribusi satwa laut dan kondisi lingkungan yang cocok untuk mengembangkan hipotesis tentang interaksi lingkungan dan satwa laut serta sebagai dasar untuk pemodelan interaksi ini, terutama untuk studi migrasi satwa laut dan daerah makanan mereka.

Denis dan Robin (2001) menciptakan alat-alat SIG untuk analisis pola spasial dalam tangkapan ikan (Perikanan Atlantic Perancis) dari metode-metode penangkapan ikan yang berbeda dan mengaitkan pola-pola ini dengan pendaratan per pelabuhan. Mereka menunjukkan bahwa tren spasial hasil tangkapan skala kecil berhubungan dengan migrasi spesies musiman di Timur Laut Atlantik. “*Animal Movement*” adalah upaya lain saat ini untuk memodelkan

pergerakan spasial dari populasi ikan. Ini adalah salah satu ekstensi ArcView GIS yang berisi satu set fungsi khusus yang dirancang untuk membantu dalam analisis pergerakan hewan. Sistem ini dikembangkan oleh USGS Alaska Biological Science Centre dan NFS Glacier Bay National Park and Preserve (Hooge *et al.*, 2000). Model pergerakan hewan “Animal Movement” didasarkan pada informasi pemilihan habitat spesies, hubungan di antara individu, pola penyebaran populasi atau efektifitas perlindungan laut dan menggunakan satu set alat klasifikasi dan algoritma pemilihan habitat. Sejalan dengan pengembangan perangkat lunak ESRI dari Arc View GIS menjadi ArcGIS, model ini dikembangkan dalam bahasa pemrograman Visual Basic pada ArcGIS versi 9x dengan nama Hawts Tools. Selanjutnya dikembangkan lagi untuk ArcGIS versi 10x dalam bahasa pemrograman Phyton yang diintegrasikan dalam Geospatial Modelling Environment (GEM).

### **APLIKASI TERKINI PEMETAAN DAN PEMODELAN MIGRASI HIU PAUS**

Hiu paus memiliki distribusi tersebar, oportunistik *filter-feeders* yang membutuhkan kepadatan besar mangsa untuk memenuhi tuntutan energik mereka (Compagno, 1984). Agregasi hiu paus umumnya di daerah produktivitas biologis tinggi, seperti blooming plankton, daerah pemijahan ikan, dan daerah di mana perubahan suhu air terjadi (Compagno, 1984; Taylor and Pearce, 1999; Heyman *et al.*, 2001; Hoffmayer *et al.*, 2005; Taylor, 2007). Pergerakan hiu paus mungkin sesuai dengan batimetri dan/atau fitur oseanografi, seperti front termal, pusaran (*eddies*), arus, dan zona konsentrasi klorofil tinggi (Taylor and Pearce, 1999; Hoffmayer *et al.*, 2005; Hsu *et al.*, 2007; Kumari and Raman, 2010). Hal ini mungkin karena adanya kumpulan zooplankton dan populasi ikan yang diketahui menumpuk di dekat fitur tersebut (Balch and Byrne, 1994).

Sampai saat ini teknologi geospasial telah diaplikasikan untuk memetakan dan memodelkan migrasi hiu paus di berbagai lokasi yang didasarkan pada kondisi lingkungan dan penampakan atau kemunculannya. Pada umumnya pemetaan dan pemodelan migrasi hiu paus menggunakan kombinasi metode dan teknologi geospasial, meliputi sistem informasi geografis, teknologi penginderaan jauh dan *satellit tracking* (GPS), dan dilengkapi dengan data pemantauan kehadiran ikan. Sequiera *et al.* (2013) secara global memetakan pola migrasi dan konektivitas dari populasi

hiu paus dari cekungan samudera yang berbeda, yaitu Lautan Pasifik, Lautan India dan Karibia. Mereka menggabungkan data kehadiran dan data tracking satelit.

Pada waktu belakangan ini telah dikembangkan model-model yang digunakan untuk menggambarkan migrasi dari spesies-spesies ikan termasuk hiu paus. Salah satunya yang dikerjakan oleh McKinney *et al.*, (2012). Mereka menggambarkan distribusi spasial agregasi makan ikan hiu paus di Northern Gulf of Mexico (NGOM) selama musim puncak dengan menggunakan 2 jenis pendekatan pemodelan distribusi spesies, yaitu:

- 1) **Maximum entropy (MaxEnt)** (Phillips *et al.*, 2006), yaitu distribusi probabilitas spesies terjadinya di seluruh wilayah studi menggunakan kompleks suite transformasi di lingkungan variabel.
- 2) **Ecological niche factor analysis (ENFA)** (Hirzel *et al.*, 2002, 2007). Mirip dengan analisis komponen utama (PCA), serangkaian orthogonal faktor ditentukan berdasarkan kombinasi linear variabel lingkungan yang dapat memberikan gambaran hubungan antara nilai-nilai yang ditemukan di lokasi di mana spesies yang hadir dengan keseluruhan area studi.

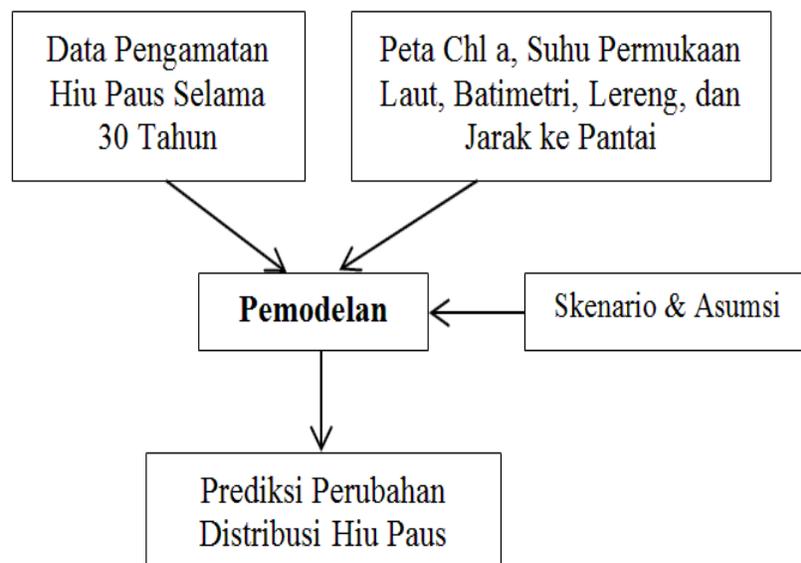
Data yang digunakan adalah data kehadiran hiu paus, data variabel lingkungan dan data untuk keperluan validasi model. Dengan menggunakan kedua jenis model, distribusi hiu tahun penelitian berbeda (2008 dan 2009) dimodelkan secara terpisah. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa habitat hiu paus yang sesuai diperkirakan mengikuti pinggir paparan benua, dan habitat yang paling cocok diprediksi di selatan dari kawasan Delta Sungai Mississippi. Distribusi spasial habitat yang sesuai adalah dinamis; Oleh karena itu, sebuah studi multi-tahun perlu dilakukan untuk lebih menggambarkan tren temporal dalam distribusi ikan hiu paus regional dan untuk mengidentifikasi daerah-daerah yang konsisten kesesuaian tinggi. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa kedua model tersebut adalah alat yang ampuh untuk menggambarkan habitat regional yang penting yang rentan untuk ruaya spesies.

Disamping pemodelan migrasi secara horizontal, beberapa penelitian juga telah dilakukan untuk memodelkan migrasi/pergerakan hiu paus secara vertikal. Salah satunya adalah yang dilakukan oleh Brunschweiler and Sims (2011) di bagian barat Lautan India. Berdasarkan model pergerakan vertikal tersebut maka dapat diperkirakan bahwa pergerakan vertikal:

- 1) Dilakukan pada fase samudera (*oceanic phase*) dalam pergerakan jarak jauh.
- 2) Dilakukan pada kondisi tidak ada hambatan batimetri.

3) Terkait perilaku makan (*foraging behavior*) ketika melewati daerah samudera yang kurang produktif.

Pemodelan yang lebih lanjut dengan skala global dilakukan oleh Sequeira *et al.* (2013), yang memprediksi pengaruh perubahan iklim terhadap distribusi dari hiu paus. Mereka menggunakan data kehadiran hiu paus selama 30 tahun dan data variabel lingkungan dengan skenario kenaikan air laut dan asumsi bahwa tidak ada upaya berarti untuk mengurangi dampak perubahan iklim. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat berdampak pada berubahnya distribusi hiu paus di tahun 2070.



Gambar 3. Metode Pendekatan Model Prediksi Dampak Perubahan Iklim Terhadap Distribusi Hiu Paus Global (Sumber: Sequeira *et al.*, 2013)

## KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas maka dapat disimpulkan beberapa hal terkait pemetaan dan pemodelan migrasi spesies ikan sebagai berikut:

- 1) Karakteristik bioekologi dan pola migrasi hiu paus menyebabkan spesies ini rentan terhadap berbagai ancaman baik dari faktor alami maupun oleh aktivitas manusia.
- 2) Pemetaan dan pemodelan koridor migrasi spesies perikanan berbasis Sistem Informasi Geografis adalah aplikasi yang relatif baru dan terus mengalami perkembangan dari waktu ke waktu.

- 3) Pemetaan dan pemodelan koridor migrasi secara umum didasarkan pada faktor variasi lingkungan dan tipe pergerakan spesies.
- 4) Kombinasi alat dan metode yang berbeda seperti data penginderaan jauh (citra satelit dan foto udara), alat bantu akustik, pengukuran parameter lingkungan secara *in-situ* dan data penampakan akan memberikan hasil model migrasi spesies hiu paus yang lebih akurat.
- 5) Hasil pemetaan dan pemodelan yang akurat akan sangat bermanfaat dalam pengambilan keputusan dan perencanaan kawasan konservasi dan pengelolaan sumberdaya perikanan laut yang berkelanjutan.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan kami sampaikan kepada Prof. Marsoedi dan Dr. Nuddin Harahab (Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya) atas saran dan masukan yang diberikan untuk melengkapi tulisan ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. T., R. A. Petit III, T. D. Read, and A. D. M. Dove, "The complete mitochondrial genome sequence of the world's largest fish, the whale shark (*Rhincodon typus*), and its comparison with those of related shark species," *Gene* vol. 539 (2014), pp. 44–49, 2010.
- Arzoumanian, Z., J. Holmberg, and B. Norman, "An astronomical pattern-matching algorithm for computer-aided identification of whale shark *Rhincodon typus*," *J. Appl. Ecol.*, Vol 42, pp. 999-1011, 2005.
- Balch, W. M. and C. F. Byrne, "Factors affecting the estimate of primary production from space," *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, pp. 7555–7570, 1994.
- Beckley, L. E., G. Cliff, M. J. Smale and L. J. V. Compagno, "Recent strandings and sightings of whale sharks in South Africa," *Environ. Biol. Fish.*, Vol. 50, pp. 343-348, 1997.
- Block, B. A., I. D. Jonsen, S. J. Jorgensen, A. J. Winship, S. A. Shaffer and S. J. Bograd, "Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean," *Nature*, Vol 475, pp. 86–90, 2011.
- Bradshaw, C. J. A., B. M. Fitzpatrick, C. C. Steinberg, B. W. Brook and M. G. Meekan, "Decline in whale shark size and abundance at Ningaloo Reef over the past decade: the world's largest fish is getting smaller," *Biological Conservation*. Vol. 141, pp. 1894-1905, 2008.
- Brunnschweiler, J. M. and D. W. Sims, "Diel oscillations in whale shark vertical movements associated with meso-and bathypelagic diving," *American Fisheries Society Symposium*, Vol. 76, pp. 1–14, 2011.
- Brunnschweiler, J. M., H. Baensch, S. J. Pierce and D. W. Sims, "Deep-diving behaviour of a Whale Shark *Rhincodon typus* during long-distance movement in the Western Indian Ocean," *Journal of Fish Biology*, Vol. 74. No. 3, pp. 706-714, 2009.

- Chang, W. B., M. Y. Leu, and L. S. Fang, "Embryos of the whale shark, *Rhincodon typus*; early growth and size distribution," *Copeia*, Vol. 2, pp. 444-446, 1997.
- Clark, E. and D. R. Nelson, "Young whale sharks, *Rhincodon typus*, feeding on a copepod bloom near La Paz, Mexico," *Environmental Biology of Fishes*, Vol. 50, pp. 63-73, 1997.
- Colman, J. G. "A review of the biology and ecology of the whale shark," *J. Fish Biol.*, Vol. 51, pp. 1219-1234, 1997.
- Compagno, L. J. V. "Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Volume 2. Bullhead, Mackerel and Carpet Sharks (Heterodontiformes, Lamniformes and Orectolobiformes)," FAO species catalogue for fishery purposes, Vol. 2, No. 1, 269p, **2001**.
- Compagno, L. J. V. "Sharks of the world: an annotated and illustrated catalogue of shark species known to date," FAO species catalogue, Vol. 4, Part 1, Hexanchiformes to Lamniformes, UN Dev. Prog., FAO, Rome. 249 pp, 1984.
- Crowder, L. B., S. Lyman, W. Figueira and J. Priddy, "Source-sink population dynamics and the problem of siting marine reserves," *Bull Mar Sci*, Vol. 66, pp. 799-820, 2000.
- Denis V. and J. P. Robin, "Present status of the French Atlantic fishery for cuttlefish (*Sepia officinalis*)," *Fisheries Research*, Vol. 52(1-2), pp.11-22, 2000.
- Die, D. J. and R. A. Watson, "A per-recruit simulation model for evaluating spatial closures in an Australian Penaeid fishery," *Aquat. Living Resour.*, Vol. 5, pp. 145-53, 1992.
- Eckert S. A. and B. S. Stewart, "Migration and movement of the whale shark (*Rhincodon typus*) in The Sea of Cortez as determined by satellite telemetry," Hubbs-Sea World Research Institute, Tech. Rep., 96-269, pp. 1-22, figs 1-10, tabs 1-2, app. 1-3, 1996.
- Fitzpatrick, B., M. Meekan and A. Richards, "Shark attack on whale shark (*Rhincodon typus*) at Ningaloo Reef, Western Australia," *Bull. Mar. Sci.*, Vol. 78, pp. 397-402, 2006.
- Gell, F. R. and C. M. Roberts, "Benefits beyond boundaries: the fishery effects of marine reserves," *Trends Ecol. Evol.*, Vol. 18, pp. 448-55, 2003.
- Heyman, W. D., R. T. Graham, B. Kjerfve, R. E. Johannes, "Whale sharks *Rhincodon typus* aggregate to feed on fish spawn in Belize," *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 215, pp. 275-282, 2001.
- Hilborn J R. and C. J. Walters, "Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty," *Rev. Fish Biol, Fish*, Vol. 2, pp. 177-8, 1992.
- Hilty, J., W. Jr. Lidicker and A. Merenlender, "Corridor ecology: the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation," Washington Island Press, Washington, 323p, 2012.
- Hirzel, A. H., J. Hausser, D. Chessel and N. Perrin, "Ecological niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data?," *Ecology*, Vol. 83, pp. 2027-2036, 2002.
- Hirzel, A. H., J. Hausser and N. Perrin, "Biomapper 4.0." Laboratory for Conservation Biology, Department of Ecology and Evolution, University of Lausanne, Switzerland." URL: <http://www2.unil.ch/biomapper>, 2007.
- Hoffmayer, E. R., J. S. Franks and J. P. Shelley, "Recent observations of the whale shark (*Rhincodon typus*) in North Central Gulf of Mexico," *Gulf Caribb. Res.*, Vol. 17, pp. 117-120, 2005.
- Hooge, P. N., W. M. Eichenlaub and E. K. Solomon, "Using GIS to analyze animal movements in the marine environment." *Spatial Processes and Management of Marine Populations. Alaska Sea Grant College Program, Anchorage Alaska*, pp. 37-51, 2001.

- Hooker, S. K., A. Cañadas, D. Hyrenbach, C. Corrigan, J. J. Polovina and R. R. Reeves, "Making protected area networks effective for marine top predators," *Endang Species Res*, Vol. 13, pp. 203-218, 2011.
- Hooker, S. K., H. Whitehead and S. Gowans, "Marine protected area design and the spatial and temporal distribution of cetaceans in a submarine canyon," *Conserv Biol.*, Vol. 13, No. 3, pp. 592-602, 1999.
- Hsu, H. H., S. J. Joung, Y. Y. Liao and K. M. Liu, "Satellite tracking of juvenile whale sharks, *Rhincodon typus*, in the Northwestern Pacific. *Fish Res.*, Vol. 84, pp. 25-31, 2007.
- Kinney, M. J. and C. F. Simpfendorfer, "Reassessing the value of nursery areas to shark conservation and management," *Conserv. Lett.*, Vol. 2, pp. 53-60, 2009.
- Kumari, B. and M. Raman, "Whale shark habitat assessments in the Northeastern Arabian Sea using satellite remote sensing," *Int J Remote Sens.*, Vol. 31, pp. 379-389, 2010.
- Lowry, L. F., K. J. Frost, R. Davis, D. P. DeMaster and R. S. Suydam, "Movements and behavior of satellite tagged spotted seals (*Phoca largha*) in The Bering and Chukchi Seas," *Polar Biology*, Vol. 19, pp. 221-230, 1998.
- McKinney, J., E. Hoffmayer, W. Wu, R. Fulford and J. Hendon, "Feeding habitat of the whale shark *Rhincodon typus* in the Northern Gulf of Mexico determined using species distribution modeling," *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 458, pp. 199-211, 2012.
- Meekan, M.G., S.N. Jarman, C.McLean and M.B. Schultz, "DNA evidence of whale sharks (*Rhincodon Typus*) feeding on red crab (*Gecarcoidea Natalis*) larvae at Christmas Island, Australia," *Marine and Freshwater Research*, Vol. 60, pp. 607-609, 2009.
- Motta, P. J., M. Maslanka, R. E. Hueter, R. L. Davis, R. de la Parra, S. L. Mulvany, M. L. Habegger, J. A. Strother, K. R. Mara, J. M. Gardiner, J. P. Tyminski and L. D. Zeigler, "Feeding anatomy, filter-feeding rate, and diet of whale sharks *Rhincodon typus* during surface ram filter feeding off the Yucatan Peninsula, Mexico," *Zoology*, Vol. 113, No. 4, pp. 199-212, 2010.
- Mullen, K. A., M. L. Peterson and S. K. Todd, "Has designating and protecting critical habitat had an impact on endangered North Atlantic right whale ship strike mortality?," *Mar. Policy*, Vol. 42, pp. 293-304, 2013.
- Mumby, P. J., "Connectivity of reef fish between mangroves and coral reefs: algorithm for the design of marine reserves at seascape scales," *Biol. Conserv.*, Vol. 128, pp. 215-222, 2006.
- Nelson D. and S. A. Eckert, "Foraging ecology of whale sharks (*Rhincodon typus*) within Bah'ia de Los Angeles, Baja California Norte, M'xico," *Fisheries Research*, Vol. 84, pp. 47-64, 2007.
- Norman B. M. and J. D. Stevens, "Size and maturity status of the whale shark (*Rhincodon typus*) at Ningaloo Reef in Western Australia," *Fish Res.*, Vol. 84, pp. 81-86, 2007.
- Norman, B. "CITES identification manual whale shark (*Rhincodon typus* Smith 1829)," ECOCEAN. Marine Species Section, Environment Australia, 2002.
- Norse, E. A. "Marine reserves: the best option for our oceans?," *Conserv Biol.*, Vol. 12, pp. 1180-97, 2003.
- Olavo, G., P. A. S. Costa, A. S. Martins, B. P. Ferreira, "Shelf-edge reefs as priority areas for conservation of reef fish diversity in the tropical Atlantic," *Aquat Conserv.*, Vol. 21, pp. 199-209, 2011.

- O'Sullivan, J. B. "A fatal attack on whale shark *Rhincodon typus*, by killer whales *Orcinus orca* off Bahia de Los Angeles Baja California,". In: Abstract of the American Elasmobranch Society 16<sup>th</sup> Annual Meeting, La Paz, Mexico, June 14-20, 2000, p.282, 2000.
- Proponent, B. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora Amendments to Appendices I and II of CITES - Eleventh meeting of the conference of the parties Nairobi (Kenya), April 10-20, 2000.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire, "Maximum entropy modeling of species geographic distributions," *Ecol Model*, Vol. 190, pp. 231–259, 2006.
- Rowell, T. W., L. W. Trites and E. G. Dawe, "Distribution of short finned squid (*Illex Illecebrosus*) larvae and juveniles in relation to the gulf stream frontal zone between Florida and Cape Hatteras," *Northwest Atlantic Fisheries Organization Science Council Studies*, Vol. 9, pp. 77–92, 1985.
- Saitoh, S. "Changes of rings and temporal and spatial variability of resources biomass," *Marine Science*, Vol. 15, pp. 274-285, 1983.
- Schmidt, J. V., C. L. Schmidt, F. Ozer, R. E. Ernst, K. A. Feldheim, M. V. Ashley and M. Levine, "Low genetic differentiation across three major ocean populations of the whale shark, *Rhincodon typus*," *PLoS ONE*, Vol. 4, No. 4, pp. e4988, 2009.
- Schneider, D. C. "Applied scaling theory. In D. L. Peterson and V.T. Parker, eds. *Ecological Scale: Theory and Applications*," Columbia University Press, NY, USA. pp. 253–269, 1998.
- Schofield, G., R. Scott, A. Dimadi, S. Fossette, K. A. Katselidis, D. Koutsoubas, M. K. S. Lilley, J. D. Pantis, A. D. Karagouni and G. C. Hays, "Evidence based marine protected area planning for a highly mobile endangered marine vertebrate," *Biol Conserv.*, Vol. 161, pp. 101–109, 2013a.
- Schofield, G., R. Scott, A. Dimadi, S. Fossette, K. A. Katselidis, D. Koutsoubas, M. K. S. Lilley, A. Luckman, J. D. Pantis, A. D. Karagouni and G. C. Hays, "Satellite tracking large numbers of individuals to infer population level dispersal and core areas for the protection of an endangered species," *Divers Distrib.*, Vol. 19, No. 7, pp. 834–844, 2013b.
- Sequeira, A. M. M., C. Mellin, M. G. Meekan, D. W. Sims and C. J. A. Bradshaw, "Review paper: inferred global connectivity of whale shark *Rhincodon typus* populations," *Journal of Fish Biology*, Vol. 82, pp. 367–389, 2013.
- Simons, L. S., R. Döring and A. Temming, "Combining area closures with catch regulations in fisheries with spatio-temporal variation: bio-economic implications for The North Sea Saithe Fishery," *Marine Policy*, Vol. 51, pp. 281-292, 2014.
- Speed, C. W., M. G. Meekan, D. Rowat, S. J. Piercek, A. D. Marshall and C. J. A. Bradshaw, "Scarring patterns and relative mortality rates of Indian Ocean whale sharks," *Journal of fish biology*, Vol 72, pp. 1488-1503, 2008.
- Stewart, B. S. and S. G. Wilson, "Threatened fishes of the world: *Rhincodon typus* (Smith 1828) (Rhincodontidae)," *Environ Biol Fishes*, Vol. 74, pp. 184-185, 2005.
- Stockhausen, W. T., R. N. Lipcius and B. M. Hickey, "Joint effects of larval dispersal, population regulation, marine reserve design, and exploitation on production and recruitment in the Caribbean spiny lobster," *Bull Mar Sci.*, Vol. 66, pp. 957-90, 2000.
- Taylor, J. G. and A. F. Pearce, "Ningaloo reef currents: implications for coral spawn dispersal, zooplankton and whale shark abundance," *J R Soc West Aust.*, Vol. 82, pp 57-65, 1999.
- Taylor, J. G. "Ram filter-feeding and nocturnal feeding of whale sharks (*Rhincodon typus*) at Ningaloo Reef, Western Australia," *Fish Res.*, Vol. 84, pp. 65-70, 2007.

- Vignaud, T. M., J. A. Maynard, R. Leblois, M. G. Meekan, R. Vázquez-Juárez, D. Ramírez-Macías, S. J. Pierce, D. Rowat, M. L. Berumen, C. Beeravolu, S. Baksay and S. Planes, “Genetic structure of populations of whale sharks among ocean basins and evidence for their historic rise and recent decline,” *Molecular Ecology*, Vol. 23, No. 10, 2014.
- Waluda, C. M., P. G. Rodhouse, P. N. Trathan and G. J. Pierce, “Remotely sensed mesoscale oceanography and the distribution of *Illex argentinus* in the South Atlantic,” *Fisheries Oceanography*, Vol.10, No. 2, pp. 207-216, 2001.
- Womble, J. N., S. M. Gende, “Post breeding season migrations of a top predator, the harbour seal (*Phoca vitulina Richardii*), from a marine protected area in Alaska,” *PlosOne*, Vol. 8, No. 2, pp. e55386, 2013.
- Zappes, C. A., C. Ventura da Silva, M. Pontalti, M. L. Danielski and A. P. Madeira Di Beneditto, “The conflict between the southern right whale and coastal fisheries on the Southern Coast of Brazil,” *Mar Policy*, Vol. 38, pp. 428-437, 2013.