

## MÔ PHỎNG DỰ BÁO SỰ DI CHUYỂN CỦA RÁC THẢI NHỰA TRÊN VÙNG BIỂN CÔN ĐẢO

Phạm Văn Song<sup>1\*</sup>, Võ Công Hoang<sup>2</sup>, Trần Tuấn Hoàng<sup>3</sup>

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này ứng dụng mô hình MIKE 21/3 Coupled Model nhằm mô phỏng thủy động lực học và chuyển tải vật chất để đánh giá sự lan truyền và nguồn phát sinh của rác thải nhựa tại vùng biển đặc khu Côn Đảo. Thông qua sử dụng dữ liệu gió, sóng, triều và địa hình đáy biển, mô phỏng sự di chuyển rác thải trên biển theo hai mùa gió đặc trưng (Tây Nam và Đông Bắc). Kết quả cho thấy, hoàn lưu dòng chảy và chế độ gió - sóng ảnh hưởng mạnh mẽ đến hướng di chuyển và nồng độ tích tụ của rác thải nhựa, đặc biệt tại các khu vực như Vịnh Đầm Tre, Hòn Bảy Cạnh, Hòn Tre Lớn và Bãi Đầm Trầu. Rác thải nhựa có xu hướng tích tụ dọc ven biển phía Tây vào mùa gió Tây Nam, trong khi phía Đông như Bến Đầm và Vịnh Đầm Tre ghi nhận mật độ cao hơn vào mùa Đông Bắc. Mô hình đã hiệu chỉnh và kiểm định các thông số với độ chính xác cao ( $R = 0,84$ ;  $NSE = 0,71$ ), phản ánh tốt quá trình chuyển tải thực tế. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho việc thiết kế hệ thống thu gom rác thải xa bờ, đồng thời đóng góp vào chiến lược phát triển kinh tế biển tuần hoàn và bền vững cho đặc khu Côn Đảo.

**Từ khóa:** Rác thải nhựa, mô hình MIKE 21/3, dự báo lan truyền rác thải, mô phỏng động lực học và chuyển tải vật chất.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Côn Đảo là một trung tâm du lịch nổi tiếng, thu hút rất đông khách tham quan. Trong khi đó, hệ thống cơ sở hạ tầng chưa theo kịp tốc độ tăng trưởng và phát triển “nóng” của ngành du lịch, gây nên nhiều sức ép cho công tác bảo vệ môi trường, trong đó có quản lý chất thải rắn và rác thải nhựa. Bên cạnh rác thải phát sinh trong đặc khu Côn Đảo, nhiều khu vực trên địa bàn Đặc khu đang phải chịu một lượng rác thải lớn từ đại dương dạt vào bờ biển.

Theo thống kê của UBND đặc khu Côn Đảo, mỗi ngày có hơn 20 tấn rác được thu gom, vận chuyển về bãi rác Bãi Nhất, trong khi công suất lò đốt chỉ xử lý được khoảng 5 tấn rác/ngày. Trong khi đó, lượng rác thải tồn đọng tính tới đầu năm 2023 là hơn 70.000 tấn vừa gây ô nhiễm môi trường và làm mất mỹ quan của khu du lịch (Báo Bà Rịa - Vũng Tàu, 2022). Bên cạnh việc tồn đọng rác thải chưa xử lý, mỗi ngày Côn Đảo cũng phải tiếp nhận thêm hàng tấn rác thải đại dương mỗi ngày. Nguy cơ Côn Đảo biến thành bãi rác đại dương đã được cảnh báo từ năm 2015 (Báo Tuổi Trẻ, 2015). Theo dữ liệu của Ban Quản lý Vườn Quốc gia Côn Đảo, trong hai năm trở lại đây, hiện tượng rác thải đại dương trôi dạt vào các vùng biển của Côn Đảo ngày càng nhiều, ước tính tăng từ 10-15 %/năm (Báo Bà Rịa – Vũng Tàu, 2022). Các loại rác đại dương nhiều nhất là từ hoạt động khai thác hải sản như: Lưới, ngư cụ cũ rách, phao cá, can nhựa, túi ni lông, ... Theo báo cáo Chương trình giám sát rác thải biển năm 2020, do Vườn Quốc gia Côn Đảo thực hiện cùng WWF-Việt Nam tại các điểm nóng về rác (Bãi Ông Đụng, Bãi

Đầm Tre, Bãi Đầm Quốc) cho thấy rác thải nhựa chiếm hơn 90 % về số lượng và hơn 55 % về khối lượng. Dữ liệu thu thập cũng cho thấy rằng khối lượng rác thải nhựa thường tăng cao vào mùa 2, là mùa gió Tây Nam mang nhiều rác thải biển vào các bãi biển. Mặt khác, với đặc trưng địa hình nhiều vịnh kín và chịu tác động mạnh mẽ từ chế độ gió mùa, khu vực Côn Đảo rất dễ bị tác động bởi sự tích tụ rác thải từ ngoài khơi dạt vào. Tuy nhiên, hiện vẫn còn thiếu các nghiên cứu định lượng mang tính hệ thống để đánh giá sự vận động của rác thải nhựa tại đây.

Nghiên cứu này nhằm phát triển một công cụ mô hình hóa tích hợp để mô phỏng các đặc trưng thủy động lực học và quá trình lan truyền hạt rác nhựa trong khu vực biển Côn Đảo. Bằng cách sử dụng các mô-đun MIKE 21/3 FM, kết hợp dữ liệu quan trắc thực tế và điều kiện khí tượng - hải văn theo mùa, nghiên cứu hướng đến việc hiểu rõ hơn về quy luật di chuyển và phân bố rác nhựa, qua đó góp phần hỗ trợ xây dựng các giải pháp quản lý và giảm thiểu ô nhiễm nhựa biển một cách hiệu quả.

### 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ SỐ LIỆU SỬ DỤNG

#### 2.1. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp mô phỏng bằng mô hình toán học. Để mô phỏng chế độ thủy động lực và sự chuyển tải rác nhựa, nghiên cứu sử dụng bộ mô hình MIKE 21/3 Coupled Model FM do Viện DHI phát triển. Mô hình MIKE 21/3 Couple Model FM là phần mềm kỹ thuật tác nghiệp để tính toán dòng chảy, sóng và các vấn đề môi trường. Mô hình này cung cấp môi trường thiết kế hoàn chỉnh và có hiệu quả cho các ứng dụng kỹ thuật, quản lý và lập kế hoạch đối với vùng biển ven bờ, cửa sông và trong sông. Sự kết hợp giữa giao diện đồ họa để sử dụng với kỹ thuật tính toán có hiệu quả đã tạo ra một

---

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghệ Miền Đông

<sup>2</sup>Phân hiệu Trường Đại học Thủy lợi

<sup>3</sup>Viện Khoa học Tài nguyên môi trường và Biến đổi khí hậu

\* Tác giả liên hệ

công cụ hữu ích cho các nhà quản lý cũng như nhà thiết kế công trình trên toàn thế giới (DHI, 2014). Nghiên cứu này sử dụng module liên hợp, kết hợp 03 module tính toán sóng (MIKE 21 SW), dòng chảy (MIKE 21 HD) và chuyển tải vật chất (MIKE 21 PT). Các mô hình này đều sử dụng lưới phi cấu trúc phù hợp tốt với các dạng đường bờ và địa hình phức tạp.

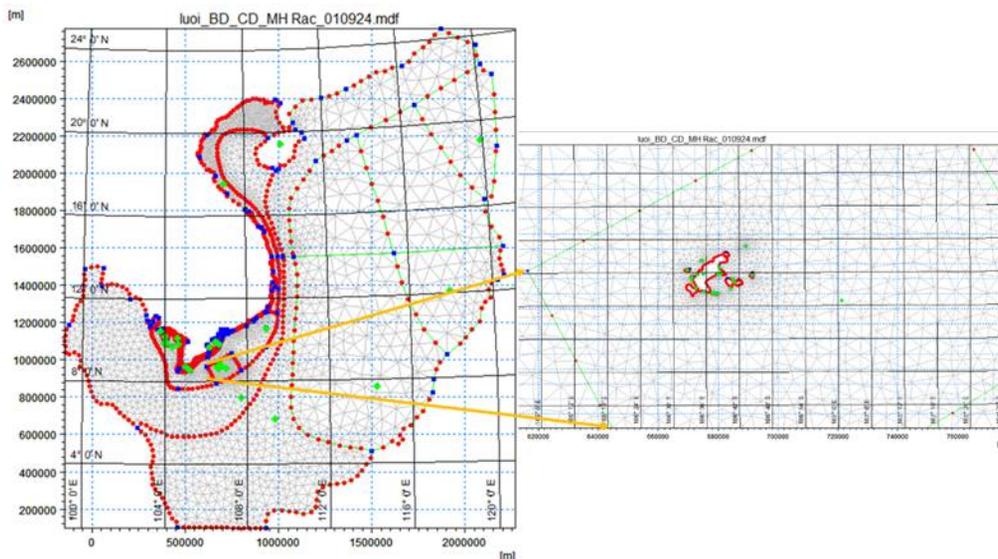
## 2.2. Xây dựng lưới tính toán của mô hình

Quần đảo Côn Đảo nằm ở tọa độ khoảng  $8^{\circ}40' - 8^{\circ}49'$  vĩ Bắc và  $106^{\circ}33' - 106^{\circ}45'$  kinh Đông, gồm 16 hòn đảo lớn nhỏ, trong đó đảo Côn Sơn lớn nhất với diện tích khoảng 52 km<sup>2</sup>. Địa hình ven đảo đa dạng với nhiều vịnh, bãi biển nhỏ xen kẽ các mũi đá và núi ven biển cao. Vùng biển xung quanh có độ sâu tăng nhanh ra xa bờ. Nhìn chung độ sâu nước khoảng 20–30 m ở sát bờ và hơn 50 m ở khu vực giữa các đảo, sâu dần về phía Biển Đông. Miền tính toán của mô hình bao gồm vùng biển xung quanh quần đảo Côn Đảo, mở rộng đủ xa để triều và sóng ngoài khơi tác động hợp lý đến khu vực nghiên cứu (khoảng vài chục km xung quanh đảo). Lưới tính phi cấu trúc có mật độ cao gần khu vực các đảo (kích thước phần tử khoảng 100–200 m) và thưa dần về phía biển xa. Tổng cộng lưới gồm trên 20.000 phần tử tam giác và hơn 12.000 nút tính, đảm bảo mô tả chi tiết địa hình ven bờ Côn Đảo (xem hình 1). Dữ

liệu độ sâu (bathymetry) được tổng hợp từ nhiều nguồn chính thức (hải đồ hàng hải của Hải quân Việt Nam, số liệu Bộ Tài nguyên & Môi trường, ...) rồi nội suy lên lưới tính.

## 2.3. Điều kiện biên và tham số mô hình

Các biên chính của mô hình là eo biển Đài Loan, Luzon, Mindoro, Babalac, và Malacca. Với module thủy động lực HD, các biên này là các biên mực nước với số liệu mực nước triều được xây dựng từ các hằng số điều hòa trích xuất từ MIKE Zero Toolbox. Ngoài ra, còn có các biên mực nước vùng cửa sông ở Nam Bộ (thuộc hệ thống sông Sài Gòn - Đồng Nai, Vàm Cỏ, Tiền và sông Hậu với dữ liệu mực nước tại các trạm Đại Ngãi, An Thuận, Bến Trại, Bình Đại, Vàm Kênh, Soài Rạp, và Dinh Bà, Lòng Tàu, Thị Vải xác định từ tương quan với mực nước triều trạm Vũng Tàu cho năm 2018 và 2023. Với module tính phổ sóng SW, các biên này được giả thiết là “lateral boundary” (biên bên) sử dụng các thông số sóng. Do vùng nghiên cứu chính là vùng biển Côn Đảo nên vùng biển từ Bình Thuận đến ĐBSCL lưới tính được chia mịn hơn. Các vùng có địa hình biển đổi phức tạp như vùng quần đảo Hoàng Sa, Trường Sa, ..., lưới tính cũng được chia nhỏ hơn. Ngoài ra biên đầu vào còn có trường gió bao phủ toàn Biển Đông và khu vực nghiên cứu cho các năm 2018 và 2023.



Hình 1. Miền tính và lưới tính mô hình MIKE 21/3 FM cho khu vực nghiên cứu

Với các tham số mô hình thì ma sát đáy trong mô hình HD sử dụng hệ số nhám Nikuradse  $k_n$  phân bố theo độ sâu. Ban đầu chọn giá trị trung bình  $k_n = 0,04$  m sau đó điều chỉnh trong quá trình hiệu chỉnh mô hình. Lực ma sát gió tác dụng lên mặt biển tính theo công thức truyền thống với hệ số ma sát phụ thuộc vào tốc độ gió (từ 0,0013 đến 0,0025 khi gió tăng từ 7 m/s đến 25 m/s). Mô hình SW sử dụng phổ sóng JONSWAP cho điều kiện ban đầu và xét đến các quá trình truyền lan, phân xạ và vỡ của sóng trong vùng nước nông ( $g = 0,7$ ). Tham số nhám đáy trong mô hình

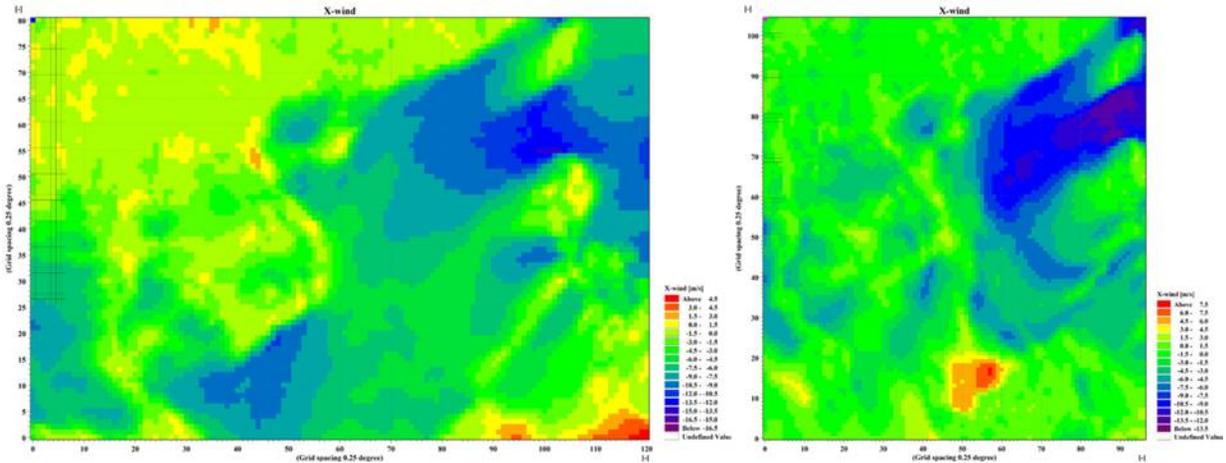
sóng (Nikuradse) cũng được điều chỉnh bằng phương pháp thử sai để phù hợp với số liệu sóng thực đo. Mô hình PT thiết lập với bước thời gian tính toán nhỏ ( $\Delta t = 60$  giây) để theo dõi chi tiết chuyển động hạt. Tần suất cập nhật dòng chảy, sóng trong mô hình PT mỗi giờ một lần (đồng bộ với đầu ra mô hình HD và SW). Quá trình lắng đọng hạt xuống đáy được xét với vận tốc lắng khác nhau tùy loại vật liệu nhựa. Các hạt nhựa nhẹ (tỷ trọng thấp, ví dụ mảnh xốp, túi nylon) hầu như không lắng đáng kể, trong khi hạt nhựa nặng hơn (như dây thừng, lưới chài) có vận tốc lắng cao

hơn, có thể chìm dần xuống đáy nếu nằm lâu trong nước tĩnh.

#### 2.4. Dữ liệu khí tượng thủy văn

Trường gió khu vực Côn Đảo được sử dụng từ cơ sở dữ liệu tái phân tích toàn cầu thế hệ 5 (ERA5 của ECMWF với độ phân giải  $0,25^\circ$  và tần suất 1 giờ). Dữ liệu gió (các thành phần u,v) năm 2018 và 2023 được thu thập dưới định dạng NetCDF, sau đó nội suy và chuyển đổi sang định dạng 2 chiều \*.dfs2 của MIKE để làm đầu vào cho mô hình SW và HD. Đối với điều kiện

sóng, mô hình MIKE 21 SW tự tính từ gió nên không cần số liệu sóng đầu vào, tuy nhiên nhóm nghiên cứu có sử dụng số liệu sóng quan trắc để hiệu chỉnh mô hình (Hình 2). Không có dòng sông lớn nào đổ trực tiếp ra vùng biển Côn Đảo, do đó, mô hình không xét đến dòng chảy sông. Các yếu tố động lực khác như mật độ nước, nhiệt độ, độ muối... được giữ không đổi, vì phạm vi nghiên cứu chủ yếu tập trung vào tác động của gió, sóng, thủy triều lên rác nổi (các biến động mật độ gây hoàn lưu nhiệt có thể bỏ qua ở vùng biển nhiệt đới nhỏ).



Hình 2. Trường gió Biển Đông và lân cận năm 2018 và năm 2023

#### 2.5. Nguồn phát thải rác thải nhựa

Dựa trên khảo sát thực địa và tài liệu hiện trạng, mô hình giả định các nguồn thải rác nhựa tập trung tại 6 địa điểm quanh Côn Đảo, là những nơi thực tế thường xuyên tồn đọng nhiều rác nhựa. Các điểm này bao gồm: Hòn Bảy Chanh (phía đông bắc đảo chính), Vịnh Đầm Tre (phía bắc đảo chính), Hòn Bà (đông nam đảo chính), Hòn Tre Lớn (phía Tây Nam, ngoài khơi đảo chính), Bãi Ông Đụng (bờ Tây đảo chính) và Bãi Đầm Trầu (bờ Tây Bắc đảo chính gần sân bay). Đây là những vị trí theo ghi nhận có lượng rác thải nhựa trôi dạt và tồn lưu lớn nhất. Mô hình thiết lập nguồn phát thải tại các điểm này dưới dạng liên tục theo thời gian với lưu lượng không đổi trong suốt các kịch bản mô phỏng (do thiếu số liệu chi tiết về thời điểm và lượng rác thải thực tế). Bảy loại rác thải nhựa điển hình được xét đến, ký hiệu từ loại 1 đến loại 7, tương ứng với các nhóm vật liệu: (1) Xốp nhẹ, (2) Bao bì nilon mỏng, (3) Chai lọ nhựa, (4) Mảnh nhựa cứng (tấm phim, ống nhựa, ...), (5) Phao, can nhựa dày, (6) Dây thừng cỡ nhỏ, (7) Lưới đánh cá, dây thừng lớn và vật liệu dệt. Mỗi loại được gán thông số về nồng độ đầu vào (khối lượng hoặc số hạt thải ra), kích thước hạt và vận tốc lắng riêng biệt dựa theo đặc tính vật lý của chúng. Trong đó, loại 4 (các mảnh nhựa cứng vừa phải) được chọn làm loại đại diện trung bình để thuận tiện theo dõi và so sánh, do loại này có các giá trị thông số gần với trung bình của tất cả 7 loại và cũng phổ biến trong rác thực tế.

Các thông số lựa chọn của mô hình chuyển tải vật chất và các loại nhựa phổ biến phục vụ tính toán mô phỏng được thể hiện trong Bảng 1.

### 3. HIỆU CHỈNH VÀ KIỂM ĐỊNH MÔ HÌNH

Số liệu thủy triều và sóng năm 2018 tại trạm hải văn Côn Đảo được sử dụng để hiệu chỉnh bước đầu các thông số mô hình. Đặc biệt, một đợt đo sóng ngắn hạn với thiết bị đo tại chỗ gần Bến Đầm (tọa độ  $8,68^\circ\text{N}$ ;  $106,60^\circ\text{E}$ ) vào ngày 17/5/2023 đã cung cấp chuỗi sóng có nghĩa và chu kỳ trung bình mỗi 10 phút trong khoảng thời gian từ 2:00–6:10 và 15:30–19:30 cùng ngày. Đây là dữ liệu quan trọng để hiệu chỉnh tham số nhám đáy cho mô hình sóng. Mô hình được chạy thử với các giá trị  $k_n$  khác nhau (0,30 m; 0,40 m; 0,45 m; 0,50 m) và so sánh độ cao sóng có nghĩa mô phỏng với số liệu đo. Kết quả cho thấy với  $k_n = 0,30$  m, mô hình dự báo sóng cao hơn thực đo đáng kể. Giá trị  $k_n = 0,40$  m cho kết quả cải thiện nhưng vẫn cao hơn thực tế khoảng 0,03–0,08 m. Khi tăng lên  $k_n = 0,45$  m, độ cao sóng mô phỏng phù hợp khá tốt với số liệu đo, sai lệch giảm đáng kể và chu kỳ sóng dao động tương đồng thực đo. Trường hợp  $k_n = 0,50$  m thì mô hình lại cho sóng thấp hơn thực tế. Do đó,  $k_n = 0,45$  m được lựa chọn làm giá trị nhám đáy tối ưu cho mô hình trong khu vực Côn Đảo.

Với bộ tham số đã lựa chọn (bao gồm  $k_n = 0,45$  m cho mô hình sóng, và các thiết lập khác như đã nêu), mô hình được chạy kiểm định lại cho cả năm 2018 nhằm đánh giá độ chính xác tổng thể. Kết quả so sánh

vận tốc dòng chảy và sóng giữa tính toán và thực đo tại trạm Côn Đảo và trạm đo liên tục cho thấy có tương đồng cao giữa mô hình và số liệu. Hệ số tương quan Pearson R đạt từ 0,61 đến 0,84 và chỉ số hiệu quả Nash–Sutcliffe (NSE) đạt 0,51–0,71 tùy tham số đánh giá (vận tốc dòng chảy, độ cao sóng). Cụ thể, đối với độ cao sóng có nghĩa, R = 0,84 và NSE = 0,71 trong giai đoạn hiệu chỉnh, và R = 0,80, NSE = 0,51 trong

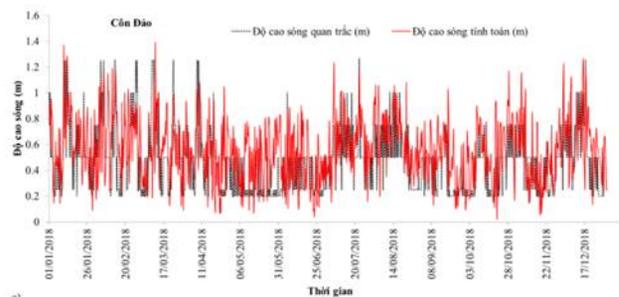
giai đoạn kiểm định độc lập (xem Bảng 2). Đối với vận tốc dòng chảy, R = 0,65 và NSE = 0,54. Đây là mức độ phù hợp chấp nhận được với mô phỏng sóng và thủy triều. Chênh lệch vận tốc dòng chảy giữa thực đo và tính toán hầu hết nhỏ hơn 10% biên độ. Còn sai số độ cao sóng trung bình khoảng 5–10 cm. Những kết quả này khẳng định mô hình đã được hiệu chỉnh, đủ tin cậy để tiến hành mô phỏng các kịch bản lan truyền rác thải nhựa.

**Bảng 1. Thông số lựa chọn của mô hình chuyển tải vật chất và các loại nhựa phổ biến phục vụ tính toán mô phỏng**

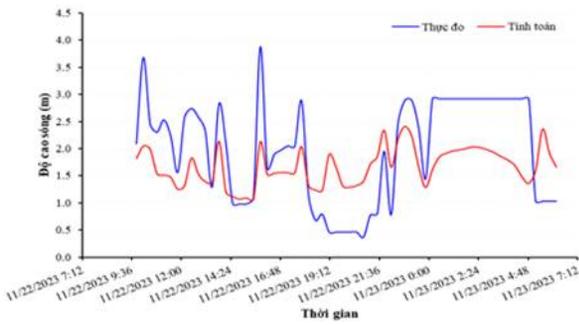
TT	Nội dung	Yếu tố	Tham số					
1	Các loại đầu vào	Loại 1	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 5e-3 mg; Thông lượng là 1e-1mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm.					
		Loại 2	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 5e-2 mg; Thông lượng là 1e-1mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm					
		Loại 3	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 1e-1 mg; Thông lượng là 1e-1mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm					
		Loại 4	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 5e-1 mg; Thông lượng là 1e0mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm					
		Loại 5	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 1e0 mg; Thông lượng là 1e+2mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm					
		Loại 6	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 1e+1 mg; Thông lượng là 1e+2mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm					
		Loại 7	Khối lượng hạt nhỏ nhất là 1e+2 mg; Thông lượng là 1e+2mg/s ứng với 10 hạt/bước thời gian; Tuổi thọ là 62 năm					
		2	Các nguồn thải ở nhiệm	TT	Tên	Easting	Northing	
		1	Hòn Bảy Cạnh	685137,1481	958311,9942			
		2	Vịnh Đầm Tre	682287,92	967626,7			
		3	Hòn Bà	672106,2736	956914,208			
		4	Hòn Tre Lớn	670319,5366	962683,8384			
		5	Bãi Ông Đụng	674524,1306	962951,5695			
		6	Bãi Đầm Trầu	678321,0433	966018,3067			
3	Tốc độ suy giảm tiêu hao	Loại 1	là 1e-15 s <sup>-1</sup> ;					
		Loại 2	là 2e-14 s <sup>-1</sup> ;					
		Loại 3	là 5e-13 s <sup>-1</sup> ;					
		Loại 4	là 7e-12 s <sup>-1</sup> ;					
		Loại 5	là 1e-11 s <sup>-1</sup> ;					
		Loại 6	là 5e-11 s <sup>-1</sup> ;					
		Loại 7	là 1e-10 s <sup>-1</sup>					
4	Quá trình lắng đọng	Loại 1	Tốc độ lắng đọng là 1e-7 m/s; Nồng độ nhỏ nhất là 1e-7 mg/m <sup>3</sup> ; Nồng độ lớn nhất là 1e+1 mg/m <sup>3</sup> .					
		Loại 2	Tốc độ lắng đọng là 1e-7 m/s; Nồng độ nhỏ nhất là 1e-7 mg/m <sup>3</sup> ;					
5	Phân tán và khuếch tán	Hệ số khuếch tán ngang là 0,1m <sup>2</sup> /s; Hệ số phân tán thẳng đứng là 0,001 m <sup>2</sup> /s.						
6	Biến đổi trôi	Sử dụng nguồn dữ liệu từ mô hình thủy động lực						
7	Tương tác nhám đáy	Sử dụng nguồn dữ liệu từ mô hình thủy động lực						
8	Đầu ra	- Theo số liệu trường từng giờ là tổng cộng, lơ lửng và sát đáy; - Theo số liệu trường điểm từng giờ; - Theo số liệu điểm trạm cụ thể từng giờ là tổng cộng, lơ lửng và sát đáy.						
TT	Tên loại nhựa	Tỉ trọng (g/mL)	Ứng dụng	Tốc độ xả thải (mg/s)	Số lượng (hạt/s)	Trọng lượng hạt nhỏ nhất (mg)	Tốc độ bảo mòn hạt (1/s)	Tốc độ lắng đọng (m/s)
1	Polyethylene	0,91 – 0,95	Túi nhựa, thùng nhựa,...	0,1	10	0,005	1e-15	1e-7
2	Polypropylene	0,9 – 0,92	Dây thừng, dây câu cá,...	0,1	10	0,05	2e-14	1e-7
3	Polystyrene	1,01 – 1,05	Phao, thùng giữ nhiệt,...	0,1	10	0,1	5e-13	1e-7
4	Polyvinyl chloride	1,16 – 1,30	Film, ống nhựa,...	1,0	10	0,5	7e-12	1,5e-7
5	Polyamide (Nylon)	1,13 – 1,15	Lưới đánh cá,...	100	10	1,0	1e-11	2e-7
6	Polyethylene terephthalate	1,34 – 1,39	Chai nhựa,...	100	10	10,0	5e-11	2e-7
7	Polyester resin	> 1,35	Dệt may, thuyền,...	100	10	100,0	1e-10	2e-7

**Bảng 2. Đánh giá độ chính xác thống kê giữa thực đo và tính toán của trạm hải văn Côn Đảo và trạm đo liên tục tọa độ: Y = 674365,23; X= 956013,54**

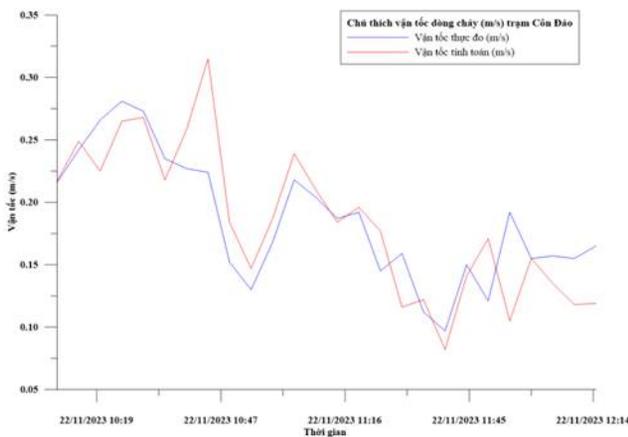
TT	Chỉ số đánh giá độ chính xác	Hiệu chỉnh năm 2018	Kiểm định năm 2023	
		Độ cao sóng	Độ cao sóng	Vận tốc dòng chảy
1	Hệ số R	0,84	0,80	0,65
2	Chỉ số NSE	0,71	0,51	0,54



*Hình 3. So sánh giữa độ cao sóng thực đo và tính toán trạm Côn Đảo năm 2018*



Hình 4. So sánh giữa độ cao sóng thực đo và tính toán trạm liên tục năm 2023



Hình 5. So sánh giữa vận tốc dòng chảy thực đo và tính toán trạm liên tục năm 2023

Sau bước hiệu chỉnh – kiểm định mô hình thủy động lực, mô hình vận chuyển rác thải nhựa (PT) được triển khai trên nền mô hình dòng chảy và sóng đã hiệu chỉnh. Các kịch bản mô phỏng xả rác liên tục ổn định tại 6 điểm nguồn được thiết kế nhằm phân tích sự di chuyển của rác nhựa trong các điều kiện mùa đặc trưng bao gồm kịch bản mùa gió Tây Nam, kịch bản mùa gió Đông Bắc và kịch bản dài hạn 1 năm. Trong quá trình mô phỏng, kết quả được xuất dưới dạng trường nồng độ rác thải nhựa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tại các thời điểm khác nhau, cũng như thống kê lượng hạt rác tích lũy tại các khu vực trọng điểm (ven các bãi biển chính, vịnh kín).

#### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng kịch bản mùa gió Tây Nam cho thấy dưới tác động của gió Tây Nam và chế độ thủy triều mùa hè, hệ thống hoàn lưu dòng chảy quanh Côn Đảo hình thành xu hướng vận chuyển nước theo vòng tròn quanh đảo. Đáng chú ý, mô hình tái hiện được hiện tượng khi triều lên, dòng chảy ven bờ tách thành hai hướng đối nghịch dọc hai bên đảo, còn khi triều xuống thì hướng dòng chảy đối chiều, cũng tạo hai dòng đối nghịch nhưng ngược lại. Sự đảo chiều dòng chảy theo chu kỳ bán nhật triều này tạo nên các vòng hoàn lưu cục bộ ven đảo, làm cho rác thải nhựa có xu

hướng bị giữ lại và luân chuyển quanh vùng ven bờ Côn Đảo thay vì trôi ngay ra xa. Sau 15 ngày mô phỏng trong điều kiện gió Tây Nam, trường nồng độ rác thải nhựa cho thấy phần lớn rác tập trung ở vùng ven biển xung quanh các đảo, đặc biệt dọc theo bờ đảo Côn Sơn và các đảo nhỏ lân cận (Hình 6). Nồng độ rác nhựa cao xuất hiện liên tục dọc các bãi biển và chân núi ven bờ, trong khi vùng khơi xa quanh đảo hầu như có nồng độ rất thấp. Điều này cho thấy rác thải nhựa dưới tác động kết hợp của gió Tây Nam và hoàn lưu triều đã bị dồn ép về phía bờ, di chuyển theo dạng dòng ven bờ bao quanh đảo. Các khu vực nổi bật có thể kể đến là:

- Phía Tây và Tây Bắc đảo Côn Sơn: Bãi Đầm Trầu và Bãi Ông Đụng là hai bãi biển hứng lượng rác lớn nhất trong mô phỏng mùa Tây Nam. Gió Tây Nam thổi hướng vào các bãi này, cộng với dòng chảy ven bờ hướng bắc, đã đẩy rác tấp vào bờ mạnh mẽ. Nồng độ rác nhựa tổng cộng mô phỏng tại đây đạt mức rất cao, từ  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  trở lên và có nơi vượt  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Rác tập trung không chỉ trên bãi biển mà còn phân bố dày đặc tại vùng nước nông ven bờ, kể cả khoảng không gian giữa đảo Côn Sơn và Hòn Tre Lớn lân cận. Hiện tượng này phù hợp với quan sát thực tế khi Bãi Đầm Trầu và Bãi Ông Đụng từ lâu đã được coi là “điểm đen” về ô nhiễm rác nhựa ở Côn Đảo (Chu Thế Cường và nnk., 2021).

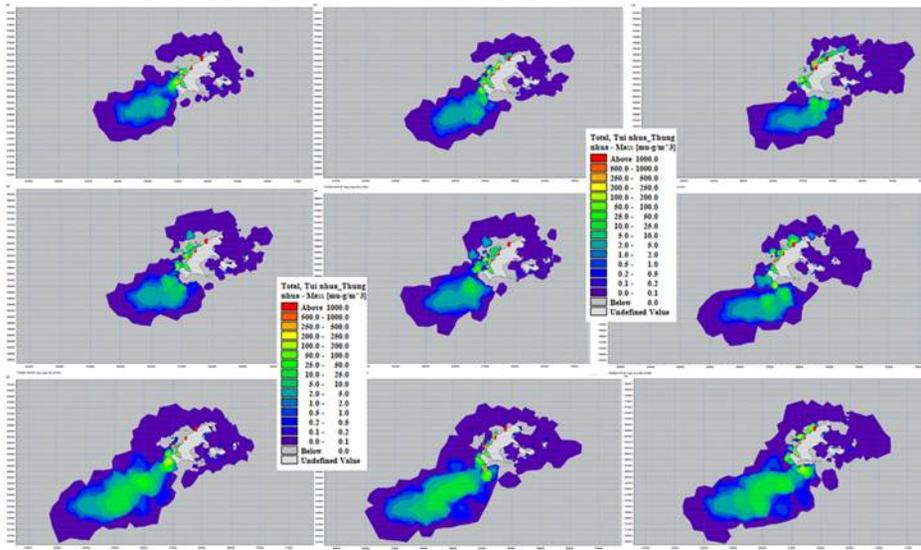
- Phía đông bắc và bắc đảo: Vịnh Đầm Tre và Bãi Vong (phía Đông đảo Côn Sơn) cũng là nơi mô hình cho thấy rác thải nhựa tập trung nhiều trong mùa Tây Nam. Mặc dù gió Tây Nam thổi ngược hướng (từ Tây Nam sang Đông Bắc) có xu hướng đẩy rác ra xa bờ phía Đông, nhưng địa hình Vịnh Đầm Tre kín và vị trí khuất gió đã khiến rác bị giữ lại. Vịnh Đầm Tre nhận rác nhựa từ cả hướng bắc và nam dồn về, đạt nồng độ cao hàng trăm  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Bãi Vong (thuộc Hòn Bảy Cạnh hoặc gần trung tâm đảo) cũng tích tụ túi nhựa và chai nhựa nổi với nồng độ ước tính  $0,2-1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Đây là các bãi tương đối kín, được bao quanh bởi rừng núi và rừng, tạo “vùng lõm” địa hình nơi rác dễ mắc lại khi trôi vào.

- Các đảo nhỏ phía nam và cụm Hòn Bà: Hòn Bà ở Đông Nam và các đảo nhỏ khác như Hòn Bảy Cạnh cũng ghi nhận có rác thải nhựa vương quanh bờ. Tuy mức độ không cao bằng các nơi kể trên nhưng mô hình cho thấy xuất hiện dây thừng, lưới vụn (loại 7) tại một số thời điểm ở khu vực Bến Đầm (cảng chính phía nam đảo) với nồng độ  $50-100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Điều này gợi ý rác từ hoạt động khai thác hải sản (lưới, dây thừng) cũng theo dòng biển trôi vào các bến cảng, bãi cát phía Nam.

Sau khoảng 15 ngày mô phỏng trong mùa Đông Bắc, phân bố rác thải nhựa tổng cộng cho thấy rác lan tỏa cả ở ven bờ lẫn ngoài khơi xung quanh Côn Đảo, nhưng nồng độ nhìn chung thấp hơn so với mùa Tây Nam. Mô hình cho thấy trên toàn bờ đông, nồng độ rác tổng cộng chỉ ở mức  $0,1-1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  đối với túi nhựa, chai nhựa; và  $50-100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  đối với vật liệu dệt, dây

thường (loại 7), chủ yếu xuất hiện tản mát tại vài thời điểm trong mùa. Ngược lại, bờ phía Tây Côn Đảo trong mùa Đông Bắc vẫn là nơi hội tụ nhiều rác hơn. Nhìn chung, trong mùa gió Đông Bắc, sự phân bố rác thải nhựa phân tán và đồng đều hơn trong không gian so với mùa Tây Nam. Không có sự chênh lệch quá lớn giữa các khu vực, ngoại trừ bờ tây vẫn cao hơn bờ đông một mức nhất định. Điều này có thể do vào thời kỳ gió mạnh (tháng 1–2), trường dòng chảy và sóng trong khu vực rất mạnh đã cuốn rác phân tán rộng, làm mờ đi phần nào khác biệt cục bộ (Nguyễn Quốc Trinh

và nnk., 2022, 2023). Mô phỏng với các mức nồng độ đầu vào khác nhau cũng cho thấy mô hình phân bố tương đối ổn định, không xuất hiện biến dị bất thường – nghĩa là nếu tăng hay giảm lượng rác thải nguồn thì hình mẫu (pattern) phân bố rác trong không gian vẫn giữ dạng tương tự, chỉ khác biệt về biên độ nồng độ. Kết quả này phù hợp với nhận định của Nguyễn Quốc Trinh và nnk (2022) khi nghiên cứu mô phỏng rác nhựa ở Đà Nẵng - Quảng Nam rằng dưới tác động gió mùa mạnh, sự phân bố rác nhựa chủ yếu do chế độ hoàn lưu quyết định, ít phụ thuộc quy mô nguồn phát thải.



Hình 6. Quá trình phát sinh và lan truyền nồng độ rác thải nhựa vùng ven biển đặc khu Côn Đảo vào mùa gió Tây Nam

Kết hợp các phân tích trên với dữ liệu thực tế, có thể nói, các nguồn phát sinh và tích tụ rác thải nhựa chính tại Côn Đảo nằm ở những khu vực đã xác định: Vịnh Đầm Tre, Hòn Bảy Cạnh, cụm Hòn Bà - Hòn Tre Lớn, Bãi Đầm Trầu, Bãi Ông Đụng. Những nơi này vừa là điểm rác trôi dạt tập kết, vừa có thể coi là “nguồn thứ cấp” phát tán rác sang chỗ khác nếu không được thu dọn (vì rác tích tụ có thể trôi trở lại biển khi điều kiện thay đổi). Kết quả mô phỏng phù hợp với Báo cáo giám sát năm 2020 của Chu Thế Cường và nnk. (2021) ở chỗ: các bãi Ông Đụng, Đầm Trầu, Vịnh Đầm Tre được báo cáo có mức độ ô nhiễm rác nhựa rất cao ngoài thực địa. Điều này củng cố độ tin cậy của mô hình. Hơn nữa, nghiên cứu của Chu Thế Cường và nnk. (2021) còn cho thấy Côn Đảo có khối lượng và tỷ lệ rác nhựa trên bãi biển cao hơn hẳn so với nhiều đảo ven bờ khác của Việt Nam - một thực tế do vị trí hứng

chịu rác từ diện rộng Biển Đông đưa tới. Thật vậy, các biển ven Châu Á gánh lượng rác thải nhựa lớn nhất thế giới do công tác quản lý chất thải còn nhiều hạn chế (Isobe và nnk. 2015, Jambeck và nnk. 2015). Kết quả nghiên cứu này minh họa cụ thể cho trường hợp Côn Đảo: Dù xa đất liền, đảo vẫn phải tiếp nhận và tích tụ lượng rác nhựa khổng lồ từ nhiều nguồn khác nhau, chủ yếu từ các hoạt động trên biển (đánh bắt hải sản, giao thông thủy) và từ đất liền (rác theo sông, theo dòng chảy ven bờ từ các nước quanh khu vực).

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Đề tài nghiên cứu ứng dụng và phát triển công nghệ cấp Tỉnh “Ứng dụng công nghệ viễn thám giám sát rác thải đại dương và xây dựng hệ thống thu gom xa bờ cho vùng biển huyện Côn Đảo, tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu. Các tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chu Thế Cường và nnk. (2021). *Chương trình giám sát và đánh giá rác thải nhựa ở bờ biển Việt Nam*, Báo cáo 2020, Hà Nội, Việt Nam. IUCN – Văn phòng Quốc gia Việt Nam, 42 trang.
- Nguyễn Quốc Trinh và nnk., (2022). *Ứng dụng mô hình 2D cho bài toán truyền tải rác thải nhựa theo đặc trưng mùa tại vùng biển Đà Nẵng – Quảng Nam*, Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 743, 36-51.

- Nguyễn Quốc Trinh và nkn., (2023). *Nghiên cứu quá trình truyền tải rác thải nhựa khu vực cửa sông ven bờ Đà Nẵng – Quảng Nam*, Báo cáo Tổng hợp Đề tài cấp Cơ sở, CSCL 10.01/22-22.
- DHI, (2014). *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic and Transport Module: Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute (DHI).
- DHI, (2014). *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Particle Tracking Module: Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute (DHI).
- Báo Bà Rịa – Vũng Tàu, (2022); <https://www.baobariavungtau.com.vn/khoa-hoc-congnghe/202207/giai-toa-noi-nhuc-nhoi-ve-xu-ly-rac-cho-con-dao-954846/>.
- Báo Tuổi Trẻ, (2015); <https://tuoitre.vn/con-dao-nguy-co-thanh-bai-rac-dai-duong-1028323.htm>.
- Isobe, A., Tokai, T., Uchida, K., Iwasaki, S., (2015). *East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics*, *Marine Pollution Bulletin*, 101, 618–623. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.042>.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L., (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*, *Science*, 347(6223), 768–771.

**Abstract:**

**MODELING AND FORECASTING MARINE PLASTIC DEBRIS TRANSPORT  
IN THE COASTAL WATERS OF CON DAO ISLAND**

*This study applies the MIKE 21/3 Coupled Model to simulate hydrodynamics and material transport to assess the dispersion and potential sources of plastic waste in the coastal waters of Con Dao Island, Vietnam. By integrating wind, wave, tide, and bathymetric data, simulations were conducted for the two dominant monsoon seasons—Southwest and Northeast. Results indicate that current circulation and wind-wave regimes play a critical role in shaping plastic debris transport and accumulation, especially in hotspots such as Dam Tre Bay, Hon Bay Canh, Hon Tre Lon, and Dam Trau Beach. Plastic debris tends to accumulate along the western coast during the Southwest monsoon, while the eastern zones (e.g., Ben Dam and Dam Tre Bay) exhibit higher concentrations during the Northeast monsoon. The model achieved high accuracy through calibration and validation ( $R^2 = 0.84$ ;  $NSE = 0.71$ ), reflecting its reliability in reproducing real-world transport processes. This research provides a solid scientific basis for designing offshore waste collection systems and contributes to the strategic development of circular and sustainable marine economies in island territories.*

**Keywords:** Marine debris, MIKE 21/3 coupled model, forecasting debris dispersion, hydrodynamic and transport modeling.

---

Ngày nhận bài: 08/8/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/10/2025