

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC



ĐINH VĂN THÌN

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ CÁNH TUABIN
VÀ CẤU HÌNH TRANG TRẠI ĐIỆN GIÓ TẠI VIỆT NAM**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT NĂNG LƯỢNG

Hà Nội – 2025

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC

ĐINH VĂN THÌN

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ CÁNH TUABIN
VÀ CẤU HÌNH TRANG TRẠI ĐIỆN GIÓ TẠI VIỆT NAM**

Ngành: Kỹ thuật năng lượng

Mã số: Thí điểm

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT NĂNG LƯỢNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Nguyễn Hữu Đức
2. TS. Lê Quang Sáng

Hà Nội – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Luận án này là công trình nghiên cứu khoa học của tôi dưới sự hướng dẫn và chỉ đạo khoa học của PGS.TS. Nguyễn Hữu Đức và TS. Lê Quang Sáng. Luận án này được thực hiện từ 2022 đến 2025 tại khoa Năng lượng Mới, trường Đại học Điện lực.

Tôi xin cam đoan rằng cơ sở lý thuyết được sử dụng trong luận án được trích dẫn đầy đủ theo quy định. Các mô hình được xây dựng và các kết quả trình bày trong luận án này do chính tôi nghiên cứu và đề xuất. Các kết quả này không bị trùng lặp và chưa được công bố bởi các nhà khoa học khác trước đây. Hầu hết các kết quả trình bày trong luận án này đã được công bố trên các tạp chí hoặc hội nghị khoa học uy tín trong nước và ngoài nước bởi nhóm nghiên cứu của tôi. Các công cụ phân tích và xử lý dữ liệu được sử dụng trong luận án này đảm bảo tuân thủ các quy định về bản quyền và sở hữu trí tuệ theo quy định. Tôi xin cam đoan và chịu hoàn toàn trách nhiệm về nội dung trình bày trong luận án này.

Hà Nội, 24/12/2025

Đinh Văn Thìn

LỜI CẢM ƠN

Luận án này được thực hiện dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Nguyễn Hữu Đức và TS. Lê Quang Sáng trong giai đoạn 2022 - 2025. Trong quá trình nghiên cứu, hai thầy hướng dẫn luôn động viên và giúp đỡ tôi vượt qua khó khăn, trở ngại để tìm ra những kết quả mới. Các thầy luôn tạo cho tôi sự tự tin và định hướng rõ ràng mục tiêu và ý nghĩa của nghiên cứu. Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến hai thầy hướng dẫn khoa học.

Trong quá trình học tập tại khoa Năng lượng mới, trường Đại học Điện lực, tôi được các giảng viên trực tiếp giảng dạy, giúp đỡ và tạo nhiều điều kiện thuận lợi để hoàn thành tốt các học phần. Tôi xin cảm ơn TS. Nguyễn Đăng Toàn - Trưởng khoa, PGS.TS. Vũ Hoàng Giang - Phó Trưởng khoa, và toàn thể các giảng viên đang công tác tại khoa Năng lượng mới. Ngoài ra, tôi xin chân thành cảm ơn lãnh đạo trường Đại học Điện lực, lãnh đạo và cán bộ phòng Quản lý Đào tạo đã tạo điều kiện thuận lợi nhất, giúp tôi hoàn tất các thủ tục giấy tờ cần thiết để hoàn thành khóa đào tạo tiến sĩ trong giai đoạn 2022 - 2025.

Đặc biệt, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành nhất đến gia đình thân yêu của tôi. Cha mẹ, anh chị em luôn là động lực giúp tôi phấn đấu vươn cao hơn trong cuộc sống. Tôi xin gửi lời cảm ơn đặc biệt nhất đến vợ và các con của tôi. Họ là nguồn sống, là nguồn cảm hứng giúp tôi biết rằng mình phải cố gắng hơn nữa, để đạt được những mục tiêu cao hơn trong công việc và cuộc sống.

Cuối cùng, tôi xin cảm ơn Quỹ Đổi mới Sáng tạo Vingroup - VINIF đã tài trợ kinh phí hỗ trợ nghiên cứu của tôi trong năm 2024. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF): “Đình Văn Thìn được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2024.TS.090”.

Mục lục	
LỜI CAM ĐOAN	ii
LỜI CẢM ƠN	iii
BẢNG KÝ HIỆU VÀ THUẬT NGỮ	vi
DANH MỤC BẢNG BIỂU	ix
DANH MỤC HÌNH VẼ	x
GIỚI THIỆU	1
Đặt vấn đề	1
Mục tiêu, phạm vi và đối tượng nghiên cứu.....	3
Các phương pháp nghiên cứu	3
Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	5
CHƯƠNG I. TỔNG QUAN	6
I.1. Xu hướng phát triển điện gió.....	6
I.2. Các giai đoạn chính của quá trình phát triển trang trại điện gió	7
I.3. Các nội dung và phương pháp nghiên cứu liên quan	9
CHƯƠNG II. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	19
II.1. Mô hình GIS và CFD	19
II.2. Lý thuyết BEM and BOM.....	21
II.3. Phương pháp PM, FIDM and LLFVWM	25
II.3.1. Phương pháp PM.....	25
II.3.2. Phương pháp FIDM.....	27
II.3.3. Phương pháp LLFVWM	29
II.4. Lý thuyết Jensen, AEP, WL và LCOE	32
II.5. Phương pháp nghiên cứu.....	36
CHƯƠNG III. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ BIÊN DẠNG CÁNH TUABIN ĐIỆN GIÓ	38
III.1. Thay đổi của tốc độ gió theo địa hình và độ cao	38
III.2. Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin	51
III.2.1. Mô hình mẫu cánh NACA6409.....	61
III.2.2. Mô hình mẫu cánh S1010.....	64
III.2.3. Mô hình mẫu cánh S1223.....	68
III.2.4. Thiết kế biên dạng cánh tuabin hoàn chỉnh	77

CHƯƠNG IV. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ CẤU HÌNH TRANG TRẠI ĐIỆN GIÓ TRÊN BỜ	84
IV.1. Xây dựng mô hình thiết kế cấu hình trang trại điện gió trên bờ ..	84
IV.2. Áp dụng mô hình thiết kế cho khu vực trang trại điện gió trên bờ tại tỉnh Khánh Hòa	86
KẾT LUẬN.....	111
DANH SÁCH CÁC CÔNG BỐ KHOA HỌC.....	114
TÀI LIỆU THAM KHẢO	117

BẢNG KÝ HIỆU VÀ THUẬT NGỮ

KÝ HIỆU	
3D	Ba chiều
BEM	Phương pháp Động học phần tử cánh
BOM	Phương pháp tối ưu Betz
CFD	Động lực học chất lưu tính toán
COD	Ngày vận hành thương mại
EVN	Tập đoàn Điện lực Việt Nam
FIDM	Phương pháp thiết kế ngược toàn phần
GIS	Hệ thống thông tin địa lý
GWEC	Hội đồng Năng lượng gió toàn cầu
LLFVWM	Phương pháp dòng xoáy tự do theo đường nâng
MC	Độ cong lớn nhất
MCP	Vị trí độ cong lớn nhất
MT	Bề dày lớn nhất
MTP	Vị trí bề dày lớn nhất
PM	Phương pháp Thanh
RANS	Navier-Stokes theo số Reynolds trung bình
WMO	Tổ chức Khí tượng thế giới
BIẾN SỐ	
A	Tiết diện, m^2
a	Hệ số giảm dọc trục
AEP	Sản lượng điện hàng năm, kWh/năm
AoA	Góc tấn công, $^\circ$
B	Số lượng cánh
CapEx	Chi phí đầu tư, \$/kW
C_d	Hệ số lực cản
C_l	Hệ số lực nâng
C_p	Hệ số công suất

C_{th}	Hệ số lực đẩy
d	Khoảng cách, m
D_{rotor}	Đường kính Rotor, m
ε	Hệ số khuếch tán của dòng chảy rối
f_b	Trọng lực, m^2/s
$f(U)$	Hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull
h_{tot}	Enthalpy toàn phần
i, j	Chỉ số của các vị trí tuabin
K	Độ nhớt dòng xoáy, $kg/(m.s)$
k	Động năng của dòng chảy rối
l	Chiều dài dòng xoáy, m
m	Số khoảng tốc độ gió
n	Số hàng lắp đặt tuabin
η_g	Hiệu suất chuyển đổi của máy phát điện
η_m	Hiệu suất chuyển đổi của hệ thống cơ khí
LCOE	Chi phí năng lượng bình quân, \$/MWh
OpEx	Chi phí vận hành và bảo dưỡng, \$/kW/năm
P	Công suất, W
p	Áp suất tĩnh, Pa
P_e	Công suất điện lối ra, W
P_s	Số hạng được tạo ra do ứng suất trượt
S	Tham số quy mô
S_E	Nguồn năng lượng bổ sung từ bên ngoài
R	Chiều dài cánh quạt, m
r	Khoảng cách đến tâm của rotor, m
r_{cw}	Tỉ lệ thay đổi của tốc độ gió theo độ dốc địa hình
rd	Tỉ lệ chiết khấu, %
T	Nhiệt độ, K

t	Thời gian, s
TI	Cường độ dòng chảy rối
Th	Lực đẩy, N
TSR	Tỉ số tốc độ gió giữa phần đuôi cánh và phần đầu cánh
U	Tốc độ gió, m/s
U_h	Tốc độ gió tại độ cao h , m/s
U_{h0}	Tốc độ gió tại độ cao h_0 , m/s
VD	Tổn thất tốc độ gió
W	Thông số độ rộng
WL	Tổn thất dòng xoáy
∇	Toán tử Gradient
α	Hệ số Hellmann
ρ	Mật độ chất lưu, kg/m ³
ν	Độ nhớt của không khí, kg/(m.s)
λ	Độ dẫn của không khí, W/(m.K)
γ	Độ lớn của dòng xoáy trên bề mặt cánh và vùng không gian xoáy phía sau cánh
σ	Độ lớn của nguồn gió trên bề mặt cánh và vùng không gian xoáy phía sau cánh
$\sigma_{\bar{U}}$	Độ lệch chuẩn của tốc độ gió trung bình
$\Psi(x, y)$	Hàm dòng
ω	Tốc độ quay của rotor, rad/s

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 3.1. Phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao ở khu vực Ninh Phước....	43
Bảng 3.2. Các thông số cơ bản của mô hình mẫu cánh NACA6409 và mẫu cánh VAST-EPU-N6409	61
Bảng 3.3. Các thông số cơ bản của mô hình biên dạng mẫu cánh S1010 và mẫu cánh VAST-EPU-S1010	64
Bảng 3.4. Các thông số cơ bản của mô hình mẫu cánh S1223 và mẫu cánh VAST-EPU-S1223.....	68
Bảng 4.1. Các thông số chính của tuabin ENERCON E103/2350	87
Bảng 4.2. Giá trị WL, AEP và LCOE theo các cấu hình lắp đặt tuabin khác nhau trong trang trại.....	106
Bảng 4.3. Giá trị AEP thu được từ các tuabin VAST-EPU-S1223	109
Bảng 6.1. Danh sách các bài báo khoa học đã được công bố	114

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 2.1. Mô hình minh họa lý thuyết BEM.	22
Hình 2.2. Các thông số chính của một mẫu cánh.....	26
Hình 2.3. Minh họa phương pháp PM đối với mẫu cánh	26
Hình 2.4. Minh họa phương pháp FIDM đối với mẫu cánh.	28
Hình 2.5. Minh họa phương pháp LLFVWM đối với cánh tuabin [53]	30
Hình 2.6. Minh họa hiệu ứng dòng xoáy gây ra bởi tuabin	32
Hình 3.1. Minh họa quá trình thay đổi phân bố tốc độ gió khi gặp vật cản	39
Hình 3.2. Sơ đồ phân tích đặc trưng địa hình và nguồn gió.	41
Hình 3.3. Mô hình hóa địa hình khu vực phát triển trang trại gió trên BlenderGIS (a) và Ansys CFX (b), (c).....	42
Hình 3.4. Dữ liệu tài nguyên gió do Ngân hàng Thế giới cung cấp	43
Hình 3.5. Địa hình của khu vực xung quanh tọa độ (45.9551°N, -118.6877°W).....	44
Hình 3.6. Phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao thu được từ dữ liệu của Ngân hàng Thế giới [62]	45
Hình 3.7. Tốc độ gió trung bình ở độ cao 80 m: (a) Ban ngày, (b) Ban đêm [66]	46
Hình 3.8. Phân bố tốc độ gió trong không gian 3D khu vực Ninh Phước	46
Hình 3.9. Phân bố tốc độ gió ở các độ cao khác nhau: (a) h=166 m, (b) h=216 m, (c) h=266 m, (d) h=316 m, (e) h=366 m, (f) h=416 m, (g) h=466 m và (h) h=516 m.....	47
Hình 3.10. Phân bố tốc độ gió ở các độ cao khác nhau trong điều kiện gió bão: (a) h=166 m, (b) h=216 m, (c) h=266 m, (d) h=316 m, (e) h=366 m, (f) h=416 m, (g) h=466 m và (h) h=516 m.....	49
Hình 3.11. Minh họa các thành phần chính của tuabin trục ngang.....	52
Hình 3.12. Minh họa đường cong đặc tính Công suất - Tốc độ gió	53
Hình 3.13. Minh họa thiết kế của một cánh tuabin gió trục ngang.....	53
Hình 3.14. Minh họa quá trình tương tác giữa dòng chảy tới và phần mẫu cánh tuabin	54
Hình 3.15. Sơ đồ của mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin	55

Hình 3.16. Mô hình mô phỏng CFD cho mẫu cánh.....	58
Hình 3.17. So sánh các thông số khí động học của NACA64A010 khi tốc độ gió là 2,96 m/s: C_l (a); C_d (b); C_l/C_d (c)	59
Hình 3.18. So sánh các thông số khí động học của NACA64A010 khi tốc độ gió là 4,78 m/s: C_l (a); C_d (b); C_l/C_d (c)	60
Hình 3.19. So sánh các thông số khí động học của NACA64A010 khi tốc độ gió là 9,73 m/s: C_l (a); C_d (b); C_l/C_d (c)	60
Hình 3.20. Hình dạng của mô hình biên dạng mẫu cánh NACA6409 và mẫu cánh VAST-EPU-N6409	61
Hình 3.21. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của NACA6409 và VAST-EPU-N6409 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s.....	62
Hình 3.22. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của NACA6409 và VAST-EPU-N6409 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s.....	63
Hình 3.23. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của NACA6409 và VAST-EPU-N6409 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s.....	64
Hình 3.24. Hình dạng của mô hình biên dạng mẫu cánh S1010 và mẫu cánh VAST-EPU-S1010.....	65
Hình 3.25. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU- S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s.....	66
Hình 3.26. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU- S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s.....	66
Hình 3.27. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU- S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s.....	67
Hình 3.28. Hình dạng của mô hình biên dạng mẫu cánh S1223 và mẫu cánh VAST-EPU-S1223	68
Hình 3.29. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1223 và VAST-EPU-S1223 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s.....	69
Hình 3.30. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1223 và VAST-EPU-S1223 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s.....	70

Hình 3.31. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1223 và VAST-EPU-S1223 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s.....	71
Hình 3.32. Sự thay đổi của các đại lượng theo số lần lặp: Sai số (a), hệ số lực nâng (b) và hệ số lực cản (c) theo các vòng lặp giải số	72
Hình 3.33. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s.....	73
Hình 3.34. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s.....	74
Hình 3.35. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s.....	74
Hình 3.36. Đường đồng mức dòng khí và các dòng xoáy khi tương tác với bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010 với các góc: $AoA=-5^\circ$ (a), $AoA=-0^\circ$ (b), $AoA=5^\circ$ (c), $AoA=10^\circ$ (d) ở tốc độ gió 4,0 m/s	75
Hình 3.37. Đường đồng mức dòng khí và các dòng xoáy khi tương tác với bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010 với các góc: $AoA=-5^\circ$ (a), $AoA=-0^\circ$ (b), $AoA=5^\circ$ (c), $AoA=10^\circ$ (d) ở tốc độ gió 5,0 m/s	76
Hình 3.38. Đường đồng mức dòng khí và các dòng xoáy khi tương tác với bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010 với các góc: $AoA=-5^\circ$ (a), $AoA=-0^\circ$ (b), $AoA=5^\circ$ (c), $AoA=10^\circ$ (d) ở tốc độ gió 6,0 m/s	76
Hình 3.39. Mối liên hệ giữa chiều dài (a), góc xoắn (b) của các phần mẫu cánh SG6043 và chiều dài toàn bộ cánh quạt.....	78
Hình 3.40. Công suất điện đầu ra tối đa (a) và hệ số công suất tối đa (b) của các tuabin sử dụng SG6043 theo tốc độ gió.....	79
Hình 3.41. Thông số thiết kế của cánh tuabin dài 5,0 m sử dụng mô hình mẫu cánh SG6043 (a) và mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1223 (b).....	80
Hình 4.1. Sơ đồ của mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin trong một trang trại điện gió trên bờ.....	85
Hình 4.2. Khu vực trang trại điện gió xung quanh tọa độ ($11^\circ 27' 51.1''N$; $109^\circ 00' 17.6''E$)	87

Hình 4.3. Sự phân bố độ cao địa hình của khu vực xung quanh tọa độ (11°27'51.1"N; 109°00'17.6"E).....	88
Hình 4.4. Thiết lập điều kiện biên và điều kiện ban đầu cho mô hình CFD	89
Hình 4.5. Hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao tại mặt phẳng lõi vào của mô hình CFD	89
Hình 4.6. Biểu đồ hoa gió tại khu vực trang trại.....	90
Hình 4.7. Thặng giáng sai số của các đại lượng: tốc độ và động lượng (a); và k và ε (b).....	91
Hình 4.8. Các vị trí được khảo sát chi tiết trong mô hình.....	92
Hình 4.9. Phân bố tốc độ gió theo độ cao tại các vị trí khác nhau.....	93
Hình 4.10. Hàm phân bố tốc độ gió Weibull trong khu vực trang trại	94
Hình 4.11. Tỷ số thay đổi vận tốc gió ở độ cao 100 m theo địa hình khu vực trang trại.....	95
Hình 4.12. Hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull đã hiệu chỉnh	95
Hình 4.13. Vị trí của 10 tuabin gió E103 trong khu vực trang trại.....	96
Hình 4.14. Công suất và hệ số công suất của tuabin E103 theo tốc độ gió	97
Hình 4.15. Cấu hình lắp đặt được đề xuất của 10 tuabin E103	98
Hình 4.16. Minh họa cấu hình lắp đặt tuabin E103.	99
Hình 4.17. Hệ số cảm ứng hướng trục của E103 theo tốc độ gió.....	99
Hình 4.18. Tổn thất tốc độ gió theo khoảng cách của tuabin E103.....	100
Hình 4.19. Thay đổi của AEP và WL theo các cấu hình lắp đặt khác nhau.....	102
Hình 4.20. Cấu hình lắp đặt các tuabin E103 tối ưu tại trang trại	103
Hình 4.21. Sự thay đổi của LCOE và AEP theo các cấu hình lắp đặt.....	107
Hình 4.22. Công suất và hệ số công suất của tuabin VAST-EPU-S1223 theo tốc độ gió.....	108

GIỚI THIỆU

Đặt vấn đề

Hiện nay, quá trình biến đổi khí hậu đang diễn ra với tốc độ nhanh hơn và phạm vi ảnh hưởng đã lan rộng trên quy mô toàn cầu. Các hậu quả của biến đổi khí hậu ngày càng trở nên nghiêm trọng, đặc biệt là vấn đề nhiệt độ tăng cao và ô nhiễm không khí. Theo báo cáo của WMO [1], nhiệt độ không khí trung bình toàn cầu năm 2024 đã tăng $(1,55 \pm 0,13)^{\circ}\text{C}$ so với giai đoạn 1850 - 1900. Nguyên nhân chính của sự nóng lên toàn cầu là do nồng độ các khí như CO_2 , CH_4 và N_2O trong không khí quá cao. Các khí này gây ra hiệu ứng nhà kính, ngăn cản quá trình thoát nhiệt từ bề mặt Trái đất. Vào cuối năm 2023, nồng độ CO_2 đạt $(420,0 \pm 0,1)$ ppm, nồng độ CH_4 đạt $(1,934 \pm 0,002)$ ppm, nồng độ N_2O đạt $(0,3369 \pm 0,0001)$ ppm. Các chất này chủ yếu được tạo ra từ việc đốt nhiên liệu hóa thạch như than đá, xăng và dầu để sản xuất điện và phục vụ giao thông vận tải của con người. Các quốc gia càng phát triển thì nhu cầu về điện và nhiên liệu vận tải càng lớn. Do đó, cần phải có các quy định và chính sách ràng buộc trên phạm vi toàn cầu để đảm bảo sự phát triển công bằng và bền vững của thế giới. Không một quốc gia nào bị bỏ lại phía sau trong việc ngăn chặn biến đổi khí hậu.

Tại COP 26, Thủ tướng Phạm Minh Chính đã cam kết Việt Nam sẽ xây dựng và thực hiện các biện pháp mạnh mẽ để giảm phát thải khí nhà kính nhằm đạt mục tiêu phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050. Kể từ đó, Chính phủ Việt Nam đã có nhiều hành động cụ thể để thực hiện cam kết này. Cụ thể, Thủ tướng đã ký và ban hành một số dự án và kế hoạch quan trọng như: Thành lập Ban Chỉ đạo Quốc gia thực hiện các cam kết của Việt Nam tại COP 26 theo Quyết định số 2157/QĐ-TTg ngày 21 tháng 12 năm 2021 [2]; Phê duyệt Dự án thực hiện Tuyên bố Chính trị về việc thành lập Quan hệ Đối tác Chuyển đổi Năng lượng Công bằng (JETP) theo Quyết định số 1009/QĐ-TTg ngày 31 tháng 8 năm 2023 [3]; Phê duyệt Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh theo Quyết định số 768/QĐ-TTg ngày 15 tháng 4 năm 2025 [4].

Thông qua các tuyên bố và Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh, Việt Nam sẽ tối đa hóa việc phát triển điện năng từ năng lượng tái tạo, tiếp tục tăng tỷ trọng năng lượng tái tạo trong cơ cấu điện lực. Đặc biệt, đẩy mạnh phát triển điện gió trên bờ, gần bờ và ngoài khơi theo khả năng hấp thụ của lưới điện, chi phí truyền tải hợp lý, đảm bảo an toàn vận hành và hiệu quả kinh tế, khai thác tối đa tiềm năng của cơ sở hạ tầng lưới điện hiện có. Tổng công suất điện gió trên bờ và gần bờ sẽ đạt khoảng 26.066 MW - 38.029 MW vào năm 2030, khoảng 84.696 MW - 91.400 MW vào năm 2050. Tổng công suất điện gió ngoài khơi để phát điện sẽ đạt khoảng 6.000 MW - 17.032 MW trong giai đoạn 2030 - 2035 và khoảng 113.503 MW - 139.097 MW vào năm 2050. Công suất điện gió ngoài khơi để sản xuất năng lượng mới sẽ đạt khoảng 15.000 MW vào năm 2035 và khoảng 240.000 MW vào năm 2050 [4]. Theo báo cáo của EVN ngày 30 tháng 4 năm 2025 [5], chưa có nhà máy điện gió ngoài khơi nào được xây dựng, trong khi công suất điện gió trên bờ nhận COD chỉ đạt 1.214,5 MW. Rõ ràng, Chính phủ Việt Nam cần có những hành động mạnh mẽ và thiết thực hơn để thực hiện các cam kết và mục tiêu trong Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh.

Theo quan điểm của Chính phủ được ban hành trong Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh, việc quy hoạch phát triển các dự án nguồn điện phải có tầm nhìn dài hạn, hiệu quả và bền vững. Phát triển điện lực phải dựa trên nguyên tắc tối ưu hóa tổng thể các yếu tố nguồn điện, truyền tải và phân phối, đồng thời đảm bảo an ninh năng lượng và bảo vệ môi trường. Tuy nhiên, các dự án điện gió đã triển khai trên thực tế còn nhiều thiếu sót, chẳng hạn như thiếu quy hoạch tổng thể quy mô quốc gia; chưa làm chủ công nghệ khảo sát, thiết kế, sản xuất, lắp đặt, vận hành, bảo trì và xử lý tuabin gió; gần như hoàn toàn phụ thuộc vào các công ty tư vấn, đầu tư và cung cấp thiết bị nước ngoài. Kết quả là, nhiều nhà máy mới đã xảy ra sự cố và tai nạn như gãy cánh tuabin, nổ máy phát điện, vận hành dưới công suất thiết kế, v.v., hoặc một số nhà máy điện gió đã chuyển giao quyền sở hữu cho các tập đoàn nước ngoài ngay sau khi ký kết hợp đồng mua

bán điện. Điều này dẫn đến hiệu quả đầu tư thấp, gây mất an ninh năng lượng và làm giảm lòng tin của người dân đối với các dự án điện gió nói chung.

Trên cơ sở các vấn đề thực tiễn, luận án này có tiêu đề "Nghiên cứu xây dựng mô hình thiết kế cánh tuabin gió và cấu hình trang trại điện gió tại Việt Nam". Đề tài nghiên cứu này là một công trình khoa học có thể được sử dụng như một nguồn tham khảo đáng tin cậy, giúp các nhà quản lý và nhà đầu tư đưa ra quyết định chính xác hơn trong các giai đoạn khảo sát, lập kế hoạch, lựa chọn vị trí dự án, thiết kế, lựa chọn tuabin và tối ưu hóa cấu hình lắp đặt tuabin trong một trang trại điện gió trên bờ, phù hợp với các đặc điểm cụ thể của các yếu tố địa hình, cơ sở hạ tầng và nguồn gió.

Mục tiêu, phạm vi và đối tượng nghiên cứu

Mục tiêu của nghiên cứu này là xây dựng mô hình thiết kế cánh tuabin và cấu hình trang trại điện gió tại Việt Nam. Các mô hình này được sử dụng để xác định khu vực phát triển, thiết kế cánh tuabin và cấu hình lắp đặt trong các trang trại điện gió trên bờ. Từ đó giúp nâng cao hiệu quả hoạt động của các trang trại điện gió trên bờ bằng cách tối đa giá trị AEP và đảm bảo giá trị LCOE phù hợp với giá mua điện hiện hành tại Việt Nam.

Phạm vi nghiên cứu là công nghệ phát điện gió sử dụng tuabin trục ngang ba cánh nhỏ. Đối tượng nghiên cứu của luận án này là các biên dạng cánh của tuabin trục ngang dưới 100kW và cấu hình lắp đặt của các trang trại điện gió trên bờ tại Việt Nam.

Các phương pháp nghiên cứu

Để thực hiện nội dung nghiên cứu trong luận án, một số phương pháp nghiên cứu đã được sử dụng, bao gồm:

- Phương pháp tìm kiếm, thu thập và xử lý thông tin, dữ liệu trực tuyến: Phương pháp này được sử dụng để giải quyết các vấn đề liên quan đến nguồn dữ liệu như đặc điểm địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió, thông số thiết kế tuabin; cơ sở lý thuyết của BEM, BOM, AEP, WL và LCOE; cơ sở lý thuyết và thư viện dữ liệu của các mô hình GIS, CFD, PM, LLFVWM.

- Phương pháp mô phỏng vật lý: Các lý thuyết vật lý khác nhau được sử dụng để mô tả, phân tích và giải thích các quá trình chuyển động và tương tác của dòng không khí trong các điều kiện cụ thể khác nhau. Các phương trình bảo toàn vật lý là nền tảng cơ bản cho các mô hình phân tích, mô phỏng số như dự báo thời tiết số, mô hình GIS và CFD. Các đặc điểm của địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió trong khu vực quan tâm sẽ được xây dựng và hiển thị trên bản đồ số dựa trên BlenderGIS, QGIS hoặc Ansys CFX, Fluent. Sau đó, tạo các mô hình 2D, 3D của các đối tượng. Tiếp theo, các mô hình này sẽ được sử dụng để mô phỏng các quá trình tương tác của gió trong các điều kiện khác nhau. Từ đó, các quá trình tương tác, hiệu ứng dòng xoáy, tổn thất năng lượng khi gió thổi qua khu vực này sẽ được xác định. Các kết quả này sẽ được sử dụng để tính toán các thông số vận hành của các tuabin khác nhau nhằm đánh giá và lựa chọn các vị trí phù hợp để lắp đặt tuabin trong các khu vực khảo sát.

- Phương pháp thống kê: Phương pháp này dựa trên dữ liệu lịch sử lớn để đưa ra dự báo. Phương pháp này được thực hiện theo phân tích chuỗi thời gian để xây dựng các hàm phân bố tần suất tốc độ gió trong khu vực hoặc các hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao địa hình tại các vị trí khác nhau. Các hàm này sẽ cung cấp dữ liệu đầu vào quan trọng cho các tính toán thiết kế và mô hình mô phỏng.

- Phương pháp phân tích:

+ Lý thuyết BEM, BOM kết hợp với PM, LLFVWM, mô hình CFD sẽ được sử dụng để nghiên cứu và thiết kế tối ưu các biên dạng cánh tuabin gió theo đặc điểm địa hình và tài nguyên gió trong các khu vực đã khảo sát. Từ đó, các thiết kế biên dạng cánh tuabin phù hợp nhất sẽ được xác định.

+ Lý thuyết BEM, Jensen kết hợp với GIS, mô hình CFD sẽ được sử dụng để nghiên cứu cấu hình lắp đặt tuabin tối ưu trong các khu vực phát triển trang trại gió nhằm đạt được AEP lớn nhất và LCOE hợp lý. Cuối cùng, cấu hình lắp đặt tuabin tối ưu cho toàn bộ khu vực phát triển trang trại gió sẽ được xác định.

Luận án này kết hợp các phương pháp nêu trên để thu được các giá trị và kết quả theo đối tượng nghiên cứu. Sau đó, các kết quả này sẽ được phân tích,

đánh giá và so sánh với các giá trị thực nghiệm và thực tế trong một số trường hợp cụ thể.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Nghiên cứu, phân tích, lựa chọn và thiết kế cánh quạt tuabin và vị trí lắp đặt trong khu vực trang trại điện gió trên đất liền là vấn đề đang được quan tâm trên toàn thế giới. Đây là một vấn đề phức tạp, liên quan đến nhiều yếu tố thực tiễn như đặc điểm địa hình, nguồn gió, loại tuabin, cơ sở hạ tầng và lưới điện, cũng như các chính sách cụ thể của từng quốc gia. Do đó, đề tài nghiên cứu này có ý nghĩa thực tiễn rất lớn. Các mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này có thể được ứng dụng rộng rãi và mang lại lợi ích to lớn không chỉ về kinh tế mà còn ở các khía cạnh khác như môi trường và xã hội. Đặc biệt, trong bối cảnh thế giới đang thực hiện quá trình chuyển đổi năng lượng và Việt Nam là một trong những quốc gia dẫn đầu.

Các mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này sử dụng kết hợp giữa lý thuyết vật lý, lý thuyết thống kê và mô hình tính toán. Lý thuyết vật lý và thống kê tạo thành nền tảng cơ bản và đáng tin cậy cho các mô hình tính toán được thực hiện trên máy tính. Mô hình GIS và CFD là các mô hình mô phỏng và tính toán chính trong luận án này. GIS với nguồn dữ liệu địa lý được cập nhật liên tục từ dữ liệu ảnh vệ tinh với độ chính xác ngày càng cao. Việc khai thác các tính năng mạnh mẽ của GIS để lựa chọn các vị trí phù hợp cho phát triển trang trại điện gió có ý nghĩa khoa học cao. Ngoài ra, CFD là một mô hình tính toán hiện đại kết hợp nhiều giải pháp toán học tiên tiến. Việc thiết lập các mô hình tính toán CFD hiệu quả và có độ chính xác cao trong các vấn đề khí động học đối với tuabin gió dựa trên các đặc điểm địa hình và nguồn gió khác nhau là một nhiệm vụ rất khó khăn, có ý nghĩa khoa học rất cao. Sự kết hợp hoàn hảo giữa GIS và CFD đang được nhiều nhóm nghiên cứu khoa học trên thế giới thực hiện và ngày càng mang lại kết quả phân tích với độ chính xác gần như tuyệt đối. Kết quả phân tích dựa trên GIS - CFD trong luận án này cũng cho thấy sai số chỉ vài phần trăm so với thí nghiệm và thực tế. Rõ ràng, mô hình kết hợp này có thể đóng góp và có ý nghĩa khoa học đối với cộng đồng khoa học toàn cầu.

CHƯƠNG I. TỔNG QUAN

I.1. Xu hướng phát triển điện gió

Năng lượng gió được kỳ vọng sẽ là nguồn năng lượng thay thế cho các nguồn năng lượng hóa thạch, đồng thời giải quyết các vấn đề lớn như đảm bảo an ninh năng lượng, giảm phát thải khí nhà kính, giảm ô nhiễm môi trường và đảm bảo sự phát triển bền vững của nhân loại trên Trái đất.

Theo báo cáo GWEC 2025 [6], tổng công suất điện gió lắp đặt trên toàn thế giới đã đạt 1.136 GW. Trong đó, công suất điện gió trên bờ đã vượt quá 1.000 GW, công suất điện gió ngoài khơi đã đạt 83,2 GW. GWEC dự báo tốc độ tăng trưởng công suất điện gió toàn cầu sẽ vào khoảng 8,8% mỗi năm trong giai đoạn 2025 - 2030. Điện gió trên bờ vẫn duy trì đà tăng trưởng mạnh, điện gió ngoài khơi sẽ tăng trưởng dần đều. Điều này cho thấy các dự án điện gió trên đất liền vẫn sẽ đóng vai trò hàng đầu trong quá trình chuyển đổi năng lượng toàn cầu trong thời gian tới.

Đối với Việt Nam, Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh [4] nêu rõ tổng công suất điện gió trên bờ và gần bờ sẽ đạt khoảng 26.066 MW - 38.029 MW (14,2% - 16,1%) vào năm 2030, khoảng 84.696 MW - 91.400 MW (10,9%) vào năm 2050. Tổng công suất điện gió ngoài khơi phục vụ nhu cầu phát điện sẽ đạt khoảng 6.000 MW - 17.032 MW trong giai đoạn 2030 - 2035 và khoảng 113.503 MW - 139.097 MW (14,7% - 16,6%) vào năm 2050. Công suất điện gió ngoài khơi phục vụ sản xuất năng lượng mới sẽ đạt khoảng 15.000 MW vào năm 2035 và khoảng 240.000 MW vào năm 2050. Trong lĩnh vực truyền tải điện, việc thâm nhập điện gió quy mô lớn là một vấn đề rất khó khăn. Do gió là nguồn năng lượng không ổn định và gián đoạn, điều này sẽ gây ra sự cố trong vận hành hệ thống truyền tải điện quốc gia. Để hạn chế rủi ro, cần thiết phải tiến hành các nghiên cứu dự báo công suất phát điện hoặc sản lượng điện trong ngắn hạn, trung hạn và dài hạn.

Các phụ lục kèm theo Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh liệt kê một số khu vực dự kiến xây dựng các dự án điện gió trên bờ và ngoài

khơi. Tuy nhiên, vị trí chính xác của các dự án này vẫn chưa được xác định. Ngoài ra, hầu hết các khu vực trên bờ của Việt Nam có tốc độ gió tại độ cao 80m từ 4,5 m/s đến 6,5 m/s. Tốc độ gió này thấp hơn đáng kể so với tốc độ gió định mức của các tuabin thương mại trên thị trường. Do đó, cần tiến hành các nghiên cứu về mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt phù hợp tại các khu vực cụ thể.

I.2. Các giai đoạn chính của quá trình phát triển trang trại điện gió

Để một trang trại điện gió đi vào hoạt động thực tế, cần trải qua nhiều giai đoạn khác nhau. Các giai đoạn chính có thể bao gồm: Lập kế hoạch; xin giấy phép và phê duyệt; đàm phán và ký kết Thỏa thuận mua bán điện; thực hiện Thỏa thuận thiết kế, mua sắm và xây dựng; vận hành, bảo trì và ngừng hoạt động.

- Lập kế hoạch: Một dự án điện gió cần được lập kế hoạch tốt để rút ngắn thời gian xin giấy phép và phê duyệt. Nhiệm vụ đầu tiên của việc lập kế hoạch là chọn vị trí chiến lược cho nhà máy điện gió. Để chọn vị trí tốt nhất, cần thu thập và đánh giá các đặc điểm của địa hình và nguồn gió. Các vị trí này cần được xem xét liệu chúng có nằm trong các khu vực cần bảo tồn (thiên nhiên, văn hóa), an ninh quốc gia hay gần khu dân cư hay không. Ngoài ra, cần xem xét cẩn thận liệu vị trí đó có gần các cơ sở hạ tầng như đường xá, sông ngòi, hệ thống truyền tải điện và đặc biệt là có tiềm năng năng lượng gió tốt hay không. Sau đó, cần tiến hành các nghiên cứu khả thi như vận chuyển, thiết kế chi tiết và kết nối lưới điện để đánh giá chi phí và hiệu quả đầu tư của dự án.

- Cấp phép và phê duyệt: Các trang trại điện gió trên bờ cần xin giấy phép thuê đất và giấy phép xây dựng. Ngoài các tài liệu liên quan đến giai đoạn nghiên cứu khả thi, nhà đầu tư cũng cần phải đính kèm các tài liệu nghiên cứu đánh giá tác động môi trường trong quá trình phê duyệt dự án.

- Đàm phán và ký kết Thỏa thuận mua bán điện: Loại hợp đồng dài hạn này quy định giá điện và lượng điện được cung cấp. Các điều khoản về giá trong Thỏa thuận mua bán điện rất quan trọng trong việc phát triển trang trại điện gió, vì giá cả cho phép nhà phát triển ước tính tổng doanh thu có sẵn trong thời hạn hợp

đồng. Nếu giá quá thấp, dòng tiền có thể không đủ để tài trợ cho dự án, dẫn đến việc dự án không thể tiếp tục tại địa điểm đã chọn. Mặt khác, nếu giá năng lượng quá cao, khách hàng sẽ không đồng ý mua với giá không kinh tế. Rõ ràng, các nhà phát triển cần phải chứng minh mức giá nào là phù hợp cho từng dự án điện gió cụ thể. Dự báo dài hạn sản lượng điện rất quan trọng để định giá chính xác.

- Thực hiện Hợp đồng thiết kế, mua sắm và xây dựng: Các nhà phát triển sẽ thực hiện hợp đồng thiết kế, mua sắm và xây dựng trang trại điện gió. Trong hợp đồng này, nhà thầu chịu trách nhiệm cho tất cả các giai đoạn công việc. Tuy nhiên, hợp đồng cho một trang trại điện gió có thể khác, vì thông thường các nhà phát triển sẽ chịu trách nhiệm mua sắm các thành phần của tuabin gió và nhà thầu sẽ chịu trách nhiệm mua sắm các vật liệu còn lại cần thiết cho việc xây dựng. Nghiên cứu đặc điểm địa hình và tài nguyên gió đóng vai trò quyết định trong việc lựa chọn thiết kế tuabin phù hợp nhất.

Tại Việt Nam, EVN chịu trách nhiệm thực hiện Hợp đồng mua bán điện. Theo Quyết định số 1508/QĐ-BCT ngày 30 tháng 5 năm 2025 [7], giá mua điện gió trên bờ khu vực phía Bắc là 1.959,4 VND/kWh, khu vực miền Trung là 1.807,4 VND/kWh, khu vực phía Nam là 1.840,3 VND/kWh; giá mua điện gió ven biển là 1.987,4 VND/kWh cho tất cả các vùng. Theo Quyết định số 1824/QĐ-BCT ngày 26 tháng 6 năm 2025 [8], giá tối đa cho các nhà máy điện gió ngoài khơi ở khu vực biển phía Bắc là 3.975,1 VND/kWh, khu vực biển Nam Trung Bộ là 3.078,9 VND/kWh, khu vực biển phía Nam là 3.868,5 VND/kWh. Rõ ràng, với cách tính giá mua điện hiện nay, các nhà đầu tư muốn đạt hiệu quả đầu tư cao cần phải nghiên cứu, lựa chọn thiết kế tuabin gió và vị trí phù hợp cho các trang trại điện gió. Ngoài ra, các nhà quản lý cũng cần nghiên cứu sát với thực tế để đưa ra mức giá chi tiết hơn, đảm bảo giá cả phù hợp và thu hút các nhà đầu tư trong và ngoài nước.

Qua sự phân tích trên, các giai đoạn chính đóng vai trò quan trọng, quyết định sự thành bại của một dự án điện gió. Trong đó, vấn đề xác định đặc điểm địa hình, cơ sở hạ tầng và tiềm năng năng lượng gió đóng vai trò then chốt trong việc

lựa chọn vị trí chiến lược. Tiếp theo, việc xác định loại tuabin và cấu hình lắp đặt tại khu vực trang trại đã chọn sẽ đóng vai trò quyết định đến hiệu quả hoạt động của tuabin và hiệu quả đầu tư của toàn bộ dự án. Điều này đòi hỏi phải nghiên cứu chi tiết cho từng vùng, tỉnh và địa phương. Do Việt Nam có địa hình dài, phần lớn là đồi núi, ảnh hưởng lớn đến việc vận chuyển và lắp đặt tuabin. Vấn đề nghiêm trọng hơn là sự tương tác của luồng không khí khi thổi qua vùng núi sẽ bị nhiễu loạn, gây tổn thất năng lượng và biến đổi lực tác động đối với các bộ phận của tuabin, đặc biệt là cánh quạt.

I.3. Các nội dung và phương pháp nghiên cứu liên quan

Nhìn chung, mỗi quốc gia trên thế giới đều có những đặc điểm riêng về địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió, quy định và chính sách. Do đó, mỗi quốc gia đều có các nhóm nghiên cứu riêng để thực hiện các nội dung nêu trên. Trong những năm gần đây, các nhóm nghiên cứu tại Việt Nam cũng đã thực hiện nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực liên quan nhằm hỗ trợ sự phát triển tổng thể của ngành năng lượng gió. Các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan cụ thể như sau:

- Trong những năm gần đây, nghiên cứu về tuabin gió trong nước vẫn còn hạn chế. Nhìn chung, các hướng nghiên cứu trong nước chủ yếu liên quan đến vấn đề khảo sát và đánh giá tiềm năng lý thuyết của năng lượng gió. Một số nội dung đáng chú ý đã được công bố là trong bài báo "Observation and Simulation of Wind Speed and Wind Power Density over Bac Lieu Region" của các tác giả tại Viện Vật lý Địa cầu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam [9]. Các tác giả đã sử dụng mô hình dự báo thời tiết WRF để mô phỏng tốc độ gió và mật độ công suất gió ở tỉnh Bạc Liêu, với độ phân giải không gian là 2,0 km. Kết quả thu được là tốc độ gió và mật độ công suất gió trong phạm vi độ cao từ 50 m đến 200 m. Phương pháp mô phỏng dựa trên mô hình dự báo thời tiết WRF là một phương pháp hiện đại, cung cấp độ tin cậy cao và được sử dụng rộng rãi trên thế giới. Tuy nhiên, cơ sở của phương pháp này dựa trên dữ liệu thời tiết từ vệ tinh NASA, sau đó dựa trên dữ liệu thời tiết đã xảy ra trong một khoảng thời gian nhất định trong quá khứ, và cuối cùng đưa ra dự báo về đặc điểm gió trung bình của khu vực.

Ngoài ra, phương pháp này có độ phân giải không gian lớn, thường khoảng km, do đó độ chính xác cũng bị hạn chế. Nghiên cứu "Offshore wind resources in the context of global climate change over a tropical area" của các tác giả tại trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội [10] cũng sử dụng mô hình thời tiết RegCM4 kết hợp với 2 kịch bản biến đổi khí hậu RCP4.5 và RCP8.5, độ phân giải không gian được sử dụng là 25km. Kết quả nghiên cứu này dự báo sản lượng điện gió ngoài khơi hàng năm của Việt Nam đạt khoảng 30,7 GWh đến 50,9 GWh trong giai đoạn 2080-2099. Phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu này cũng có những hạn chế tương tự như trong bài nghiên cứu của các tác giả đến từ Viện Vật lý Địa cầu.

+ Cũng nghiên cứu về dự báo tiềm năng tài nguyên gió, nghiên cứu "Marine spatial planning for offshore wind power using GIS" của các nhà nghiên cứu tại Công ty Cổ phần Tư vấn Xây dựng Điện 2 [11]. Các tác giả đã sử dụng phương pháp GIS kết hợp với phương pháp Fuzzy Logic để dự báo một số khu vực có tiềm năng khai thác gần bờ và ngoài khơi tại Việt Nam. Phương pháp này dựa trên dữ liệu từ bản đồ vùng biển, thềm lục địa và các quy định về phát triển tài nguyên biển và đảo của Việt Nam, sau đó kết hợp với các mô hình tính toán phân tích để xác định các khu vực có tiềm năng khai thác năng lượng gió. Phương pháp này không có độ chính xác và độ tin cậy cao, chỉ phù hợp với giai đoạn khảo sát sơ bộ tài nguyên gió.

- Hướng nghiên cứu thứ hai là các chủ đề nghiên cứu và bài báo trong lĩnh vực tính toán và thiết kế tuabin gió. Nghiên cứu "Study the overview of wind turbines and the factors that affect the power output of the turbine" của các tác giả tại trường Đại học Quảng Bình [12]. Tác giả đã thực hiện tổng quan về một số lý thuyết để xác định công suất đầu ra của tuabin gió. Ấn phẩm này chỉ nhằm mục đích giới thiệu một số thông tin cơ bản trong lĩnh vực tính toán tuabin gió. Ngoài ra, một nghiên cứu về thiết kế tuabin gió khác có thể được đề cập là "Research and calculation design for counter – rotating wind turbine use with low wind speed range" của các nhà nghiên cứu tại Đại học Bách khoa Hà Nội [13]. Các tác giả đã

sử dụng phương pháp BEM, kết hợp với mô hình Krangten và Glauert để thiết kế tuabin trục ngang loại cánh kép, công suất của loại tuabin này đạt từ 1,5-5,0 kW hoạt động ở tốc độ gió 6,0-9,0 m/s. Các phương pháp chủ yếu dựa trên các công thức phân tích, không đánh giá toàn diện các yếu tố ảnh hưởng. Các tuabin này có đường kính cánh quạt là 4,2 m và 5,2 m, nhưng tạo ra công suất rất thấp, không hiệu quả ở những vùng có tốc độ gió từ 6,0 đến 9,0 m/s.

+ Gần đây, một số nghiên cứu về thiết kế tuabin gió trục đứng kiểu Savonius và Darrieus cũng đã thu hút sự chú ý [14], [15]. Các nghiên cứu này sử dụng các phương pháp khác nhau để thiết kế và cải tiến cánh quạt của tuabin trục đứng. Sau đó, các nhà nghiên cứu sử dụng phương pháp CFD để mô phỏng, xác minh kết quả và cuối cùng chế tạo các mô hình thí điểm. Các thiết kế tuabin này đều nhỏ gọn, kích thước khoảng vài mét, phù hợp để lắp đặt ở các khu vực dân cư đông đúc như khu đô thị và các thành phố lớn. Tuy nhiên, công suất của các loại tuabin này khá nhỏ, do đó chúng không thể đạt được hiệu suất hoạt động cao tại các khu vực có tốc độ gió phổ biến ở Việt Nam.

Từ phân tích các chủ đề nghiên cứu và ấn phẩm đã được công bố trong nước liên quan đến lĩnh vực năng lượng gió như trên, tác giả cho rằng các nghiên cứu trong nước vẫn còn thiếu cả về số lượng và chất lượng. Điều này cho thấy cần có những nghiên cứu chuyên sâu hơn, sử dụng các phương pháp hiện đại hơn, đặc biệt là trong lĩnh vực liên quan đến thiết kế, nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động của các tuabin gió.

- Đối với các nghiên cứu quốc tế, nghiên cứu về đánh giá tài nguyên gió cho các khu vực xây dựng trang trại gió rất được quan tâm, chẳng hạn như trong bài báo “Micro-scale wind resource assessment in complex terrain based on CFD coupled measurement from multiple masts” của các nhà khoa học Đức [16]; hoặc bài báo “Topology optimization of wind farm layouts” của các nhà khoa học Đan Mạch [17]; bài báo “Wind energy evaluation for a highly complex terrain using CFD” của các nhà khoa học Mauritius [18], vv... Các phương pháp được các nhóm này sử dụng đều dựa trên CFD kết hợp với một số mô hình khác nhau để

đánh giá tài nguyên gió tại từng vị trí cụ thể, và cuối cùng cung cấp cấu hình tối ưu để lắp đặt tuabin gió.

+ Ngoài ra, hiện nay trên thế giới có hàng chục nghìn nghiên cứu về thiết kế và cải thiện hiệu suất khí động học của cánh tuabin gió trong các điều kiện hoạt động khác nhau. Ví dụ, bài báo “CFD-based curved tip shape design for wind turbine blades” [19], sử dụng phương pháp CFD để thiết kế lại hình dạng của cánh tuabin; Bài báo “NACA2412 airfoil based method for design and aerodynamic analysis of small HAWT using modified BEM approach” [20] sử dụng phương pháp BEM để thiết kế cánh tuabin nhỏ dựa trên mô hình mẫu cánh NACA2412; Hoặc bài báo “Aerodynamic performance enhancement of horizontal axis wind turbines by dimples on blades: Numerical investigation” [21], các tác giả đã tạo ra các lỗ trên bề mặt cánh để tăng lực nâng của cánh tuabin, vv... Hiện nay, hầu hết các nhóm nghiên cứu trên thế giới đang tập trung vào việc thay đổi thiết kế cánh tuabin, tìm ra các thiết kế cánh có thể khai thác tối ưu nhất động năng của gió. Đây là nội dung quan trọng nhất, góp phần quyết định vào vấn đề nâng cao hiệu quả hoạt động của tuabin gió, đặc biệt trong điều kiện tốc độ gió trung bình và thấp.

+ Để khai thác nhiều năng lượng gió hơn, cánh tuabin ngày càng được nghiên cứu và chế tạo với kích thước lớn hơn. Tuy nhiên, chúng ta cũng phải chú ý đến vấn đề tương thích giữa động năng của gió và kích thước của cánh tuabin. Đây cũng là một vấn đề rất quan trọng để đảm bảo hoạt động hiệu quả của tuabin gió. Một số nghiên cứu về việc khảo sát các loại cánh và kích thước cánh cho các điều kiện tốc độ gió khác nhau có thể được tìm thấy trong bài báo “High-resolution direct numerical simulations of flow structure and aerodynamic performance of wind turbine airfoil at wide range of Reynolds numbers” [22], hoặc trong bài báo “Airfoil type and blade size effects on the aerodynamic performance of small-scale wind turbines: Computational fluid dynamics investigation” [23]. Hướng nghiên cứu này đóng một vai trò rất quan trọng. Tuy nhiên, nếu xây dựng các mô hình thực tế để thử nghiệm và điều tra, nó sẽ rất tốn kém. Do đó, các nhóm nghiên

cứu thường sử dụng phương pháp phân tích CFD, một phương pháp rất hiện đại và cho kết quả có độ chính xác cao.

Qua sự phân tích sơ lược một số đề tài nghiên cứu và công trình khoa học trong nước và quốc tế thời gian gần đây, tác giả đã ghi nhận một số giá trị về cả nội dung và phương pháp nghiên cứu cần thiết để nâng cao hiệu quả hoạt động của các tuabin gió tại Việt Nam. Tuy nhiên, vẫn còn có một số khoảng trống nghiên cứu cần phải được làm rõ ràng và chuyên sâu hơn. Các nội dung nghiên cứu còn thiếu có thể bao gồm:

- Nghiên cứu và đánh giá tiềm năng năng lượng gió toàn lãnh thổ và hải đảo Việt Nam, từ đó cung cấp cơ sở cho việc dự báo vĩ mô về tiềm năng phát triển và đóng góp của năng lượng gió. Nội dung này đã được một số nhóm nghiên cứu và đạt được nhiều kết quả rõ ràng và đáng tin cậy. Tuy nhiên, vẫn cần thiết phải thực hiện các nghiên cứu chuyên sâu hơn.

- Nghiên cứu và đánh giá chi tiết đặc điểm tài nguyên gió và ảnh hưởng của địa hình tại các khu vực xây dựng trang trại gió, từ đó xác định vị trí lắp đặt tối ưu cho các tuabin gió. Nội dung này chưa được nhiều nhà đầu tư và nhà khoa học trong nước quan tâm và nghiên cứu. Nội dung này là một khoảng trống nghiên cứu rất lớn tại Việt Nam hiện nay.

- Nghiên cứu về tính phù hợp và cải thiện hiệu suất khí động học của cánh tuabin gió trong điều kiện vận hành với tốc độ gió tại từng khu vực cụ thể. Các nghiên cứu này thường được chia thành hai nhóm: nghiên cứu về thay đổi thiết kế mô hình mẫu cánh, và nghiên cứu về thay đổi cấu hình và kích thước của toàn bộ cánh tuabin gió. Nội dung này chưa được nhiều nhà đầu tư và nhà khoa học trong nước quan tâm và nghiên cứu. Nội dung này cũng là một khoảng trống nghiên cứu rất lớn tại Việt Nam hiện nay.

- Nghiên cứu về thiết kế hoặc lựa chọn các loại máy phát điện khác nhau để giải quyết các vấn đề liên quan đến kết nối lưới điện. Nội dung này chưa nhận được nhiều sự quan tâm và nghiên cứu từ các nhà đầu tư và nhà khoa học trong

nước. Tuy nhiên, nội dung này không được nghiên cứu chuyên sâu trong luận án này.

- Nghiên cứu về khả năng tái chế các thành phần chính của tuabin gió sau khi chúng hết hạn sử dụng và ngừng hoạt động. Nội dung này chưa nhận được nhiều sự quan tâm và nghiên cứu từ các nhà đầu tư và nhà khoa học trong nước. Tuy nhiên, nội dung này cũng không được nghiên cứu chuyên sâu trong luận án này.

Rõ ràng, tác giả đã kế thừa các nội dung và phương pháp nghiên cứu từ các nhóm nghiên cứu trong nước và quốc tế. Tuy nhiên, vẫn còn một số nội dung chưa được nghiên cứu rõ ràng và chính xác, chẳng hạn như nội dung về đánh giá đặc điểm nguồn gió theo địa hình của khu vực xây dựng cụ thể; nội dung về thiết kế nhằm nâng cao hiệu suất khí động học và cấu hình lắp đặt tuabin gió theo các điều kiện cụ thể khác nhau của trang trại. Do đó, luận án này sẽ tiến hành nghiên cứu chuyên sâu về hai nội dung nêu trên. Về phương pháp nghiên cứu, các ấn phẩm trong nước thường sử dụng các mô hình và phương pháp nghiên cứu đơn lẻ đã phổ biến trên thế giới. Vì vậy, độ chính xác vẫn còn hạn chế. Luận án này chủ yếu sẽ sử dụng phương pháp CFD kết hợp với phương pháp GIS để tiến hành nghiên cứu mô phỏng. Phương pháp CFD là phương pháp được nhiều quốc gia ưa chuộng vì tính rõ ràng và độ chính xác cao. Phương pháp GIS cung cấp dữ liệu chi tiết về địa hình và cơ sở hạ tầng, giúp việc lựa chọn vị trí cấu hình trang trại trở nên trực quan và thiết thực.

Trong phạm vi trang trại gió, để dự báo hoặc tính toán công suất phát điện hoặc AEP, cần thực hiện hai nhiệm vụ chính: tính toán sự thay đổi tốc độ gió trong thời gian dài ở độ cao tương ứng với trục tuabin và xác định tổn thất năng lượng gió do địa hình và tuabin gây ra trong quá trình vận hành. Trong đó, các yếu tố địa hình, thiết kế và cấu hình lắp đặt tuabin có ảnh hưởng đến đặc điểm của nguồn gió. Do đó, để xác định chính xác giá trị AEP, cần phải xem xét ba yếu tố đầu vào quan trọng nhất: nguồn gió, loại tuabin và địa hình.

- Các phương pháp dự báo sự thay đổi tốc độ gió trong dài hạn bao gồm:

+ Phương pháp mô phỏng vật lý: Phương pháp giảm dần quy mô từ toàn cầu, lục địa, khu vực, địa phương, khu vực trang trại gió dựa trên các mô hình dự báo thời tiết số. Các mô hình dự báo thời tiết số có thể trực tiếp sử dụng dữ liệu hình ảnh vệ tinh thời gian thực hoặc sử dụng thư viện dữ liệu tái phân tích. Phương pháp này sử dụng nhiều dữ liệu về độ nhám địa hình, nhiệt độ, áp suất, độ ẩm, vv... làm dữ liệu đầu vào cho các hệ phương trình vật lý [24], [25], [25], [27]. Các hệ phương trình vật lý này sau đó có thể được giải bằng nhiều kỹ thuật khác nhau. Trong luận án này, kỹ thuật RANS sẽ được sử dụng để giải các hệ phương trình bảo toàn vật lý cho các mô hình CFD. Phương pháp này được sử dụng để tính toán các đặc điểm của địa hình, nguồn gió và tương tác với tuabin trong một trang trại. Do đó, phương pháp này đòi hỏi người thực hiện phải có chuyên môn và kinh nghiệm chuyên sâu, cùng với một hệ thống máy tính cấu hình cao.

+ Phương pháp thống kê: Phương pháp này dựa trên dữ liệu lịch sử lớn để đưa ra dự báo, không dựa trên các điều kiện thực tế cụ thể. Trước đây, phương pháp này thường được thực hiện theo phân tích chuỗi thời gian để xây dựng các hàm tuyến tính và phi tuyến tính. Sau đó, dựa trên các kỹ thuật hồi quy khác nhau để đưa ra dự báo [28], [29], [30]. Trong những năm gần đây, phương pháp này thường được thực hiện với các mô hình trí tuệ nhân tạo (AI) như mạng nơ-ron, mạng nơ-ron mờ, vv... Trong luận án này, phương pháp thống kê được sử dụng để dự báo các hàm phân bố tần suất tốc độ gió theo các vị trí và độ cao khác nhau trong khu vực trang trại.

+ Phương pháp học máy hoặc học sâu: Các phương pháp dự báo dựa trên AI bao gồm Extreme Learning Machines, Light Gradient Boosting Machine, Artificial Neural Network, Convolutional Neural Network, Recurrent Neural Network, Long Short-term Memory Network [29], [31]. Các mô hình này dựa trên mối quan hệ giữa công suất lịch sử, tốc độ và hướng gió, cùng các biến số khí tượng để đưa ra dự báo trong tương lai. Để có được dự báo chính xác hơn, các mô hình này cần được bổ sung thêm nhiều dữ liệu lịch sử để đào tạo. Điều này đòi

hỏi phải có đủ dữ liệu lịch sử cho khu vực trang trại điện gió để có thể đưa ra dự báo đáng tin cậy. Ngoài ra, các mô hình dự báo cho nhà máy này không thể áp dụng cho các nhà máy khác. Do đó, các phương pháp này đang gặp phải những hạn chế lớn vì các nhà máy điện gió ở Việt Nam chưa đi vào hoạt động trong thời gian dài. Điều này dẫn đến sự thiếu hụt của các dữ liệu thực tế cần thiết, kéo theo các dự đoán không chính xác của các mô hình dự báo dựa trên AI. Vì vậy, các phương pháp học máy và học sâu không được sử dụng trong luận án này. Tuy nhiên, chúng sẽ được phát triển trong các nghiên cứu tương lai gần.

+ Phương pháp tương quan không gian: Nhiều mô hình toán học cũng liên quan đến vấn đề dự báo tốc độ và hướng gió cho các địa hình cụ thể, chẳng hạn như mô hình tương quan không gian. Mô hình này giúp xác định giá trị tốc độ gió tại các vị trí khác nhau từ một điểm tham chiếu được chỉ định. Từ đó, các mô hình dự báo có thể được đưa ra cho một khu vực dựa trên các phép đo và quan sát ở một khu vực khác [32]. Phương pháp này cũng có thể được tích hợp vào các mô hình trí tuệ nhân tạo như Artificial Neural Network, Local Feedback Dynamic Fuzzy Neural Network, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System [29]. Phương pháp này cũng không được sử dụng trong luận án này do thiếu dữ liệu thực tế.

+ Phương pháp kết hợp: Gần đây, các nghiên cứu dự báo kết hợp đang ngày càng được phát triển để kết hợp thế mạnh của từng phương pháp. Một số mô hình kết hợp nổi bật là CFD và Mạng thần kinh nhân tạo [33]; kết hợp các mô hình AI như XGBOOST, Mạng nơ-ron đa lớp với Tối ưu hóa Bayes, Cây hồi quy tăng cường gradient, Tập hợp (Tăng cường gradient và XGBOOST), và CNN Long Short-Term Memory [29], [31], vv... Phương pháp này có nhiều ưu điểm so với việc sử dụng một phương pháp đơn lẻ. Do đó, phương pháp kết hợp được sử dụng làm khung cơ bản. Luận án này sử dụng sự kết hợp giữa GIS-CFD với các hàm lý thuyết để xác định các đại lượng liên quan đến hàm mục tiêu AEP.

- Tổn thất năng lượng gió do địa hình và tuabin: Ngoài dữ liệu tài nguyên gió, các yếu tố đầu vào cho phân tích này bao gồm: Địa hình của khu vực và vùng lân cận; Cấu hình trang trại gió và chiều cao trục tuabin; Đặc tính hoạt động của

tuabin gió như đường cong công suất và đường cong lực đẩy so với tốc độ gió; Mật độ không khí và cường độ nhiễu loạn của dòng chảy tới tại vị trí cánh tuabin. Sự kết hợp giữa CFD và các hàm lý thuyết cũng được sử dụng để xác định sự tương tác và tổn thất năng lượng gió do địa hình và tuabin. Dữ liệu GIS cũng được sử dụng để cung cấp các đặc điểm địa hình của trang trại gió, cung cấp dữ liệu đầu vào cho các mô hình GIS-CFD kết hợp.

Luận án này nghiên cứu các mô hình thiết kế nhằm nâng cao hiệu quả khai thác năng lượng gió của cánh quạt tuabin và cấu hình lắp đặt các trang trại điện gió trên bờ trong điều kiện cụ thể tại Việt Nam. Nội dung nghiên cứu chính bao gồm:

- Nghiên cứu địa hình, cơ sở hạ tầng và tiềm năng năng lượng gió trên bờ tại các khu vực quy hoạch. Từ đó, xác định các vị trí chiến lược và tối ưu cho việc phát triển trang trại điện gió. Kết quả thu được sẽ là cơ sở đầu vào để phát triển thiết kế cánh quạt tuabin và cấu hình lắp đặt trong các trang trại.

- Nghiên cứu xây dựng mô hình thiết kế cánh quạt tuabin theo đặc điểm tài nguyên gió tại các khu vực phát triển trang trại điện gió. Từ đó, đề xuất các thiết kế cánh quạt tuabin đạt hệ số công suất lớn nhất trong điều kiện tốc độ gió phổ biến tại Việt Nam.

- Nghiên cứu xây dựng mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin trong các khu vực trang trại điện gió để đạt được sản lượng điện hàng năm lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý.

Những nội dung nghiên cứu này sẽ đóng góp chủ yếu vào giai đoạn quan trọng trong phát triển các dự án điện gió trên bờ tại Việt Nam, đó là giai đoạn “Lập kế hoạch và ký kết Hợp đồng mua bán điện”. Luận án sử dụng kết hợp các phương pháp vật lý, phương pháp thống kê thông qua kỹ thuật mô phỏng số và tính toán phân tích để giải quyết các nội dung nghiên cứu đã đề ra.

Tóm lại:

Để các dự án điện gió trên bờ tại Việt Nam đạt hiệu quả cao, cần đảm bảo

tối đa hóa giá trị AEP và giá trị LCOE phù hợp với giá mua điện hiện hành. Để tính toán giá trị AEP và LCOE, cần có các phương pháp tính toán dựa trên điều kiện cụ thể về địa hình, nguồn gió và loại tuabin cho từng trang trại điện gió trong dài hạn. Nghiên cứu về các nội dung này chưa được thực hiện tại Việt Nam. Đây là một khoảng trống nghiên cứu và luận án này tiến hành các nghiên cứu để lấp đầy khoảng trống đó.

Các phương pháp hiện đại như học máy và học sâu có khả năng dự báo rất tốt. Tuy nhiên, hạn chế của các phương pháp này là chúng yêu cầu lượng dữ liệu lịch sử đủ lớn để huấn luyện các mô hình dựa trên AI. Do đó, các phương pháp này hiện chưa hiệu quả đối với các nhà máy điện gió tại Việt Nam.

Vì vậy, luận án đã sử dụng sự kết hợp giữa các phương pháp vật lý và thống kê thông qua GIS, CFD, các mô hình phân tích PM và các lý thuyết BEM, BOM, Jensen để xây dựng các mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt của các trang trại điện gió nhằm đạt hiệu suất khai thác năng lượng gió cao nhất. Cơ sở lý thuyết chi tiết của các phương pháp và lý thuyết này được trình bày trong Chương II.

CHƯƠNG II. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Luận án này nghiên cứu 2 nội dung chính bao gồm: Nghiên cứu mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin theo đặc điểm tài nguyên gió tại các khu vực trang trại gió. Từ đó, đề xuất các thiết kế biên dạng cánh cho hệ số công suất lớn nhất; Nghiên cứu mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin tại các khu vực trang trại gió với mục tiêu đạt được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý.

Để thực hiện các nội dung nghiên cứu chính trên, cần sử dụng một số lý thuyết phân tích và mô hình mô phỏng, bao gồm:

- Mô hình GIS và CFD để nghiên cứu, đánh giá và lựa chọn các khu vực tiềm năng cho trang trại gió trên bờ. Kết quả từ mô hình phân tích này sẽ xác định các đặc điểm địa hình và tài nguyên gió như độ cao và độ nhám địa hình, tốc độ gió trung bình và cường độ nhiễu loạn để làm tham số đầu vào cho mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt.

- Lý thuyết phân tích BEM và BOM kết hợp với các mô hình mô phỏng PM, LLFVWM và CFD để nghiên cứu biên dạng cánh và các thông số vận hành của tuabin gió theo đặc điểm tài nguyên gió với mục tiêu đạt được hệ số công suất lớn nhất.

- Kết hợp các lý thuyết phân tích BEM và Jensen với mô hình GIS và CFD để nghiên cứu thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin trong các khu vực trang trại gió với mục tiêu đạt được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý.

II.1. Mô hình GIS và CFD

GIS là một mô hình cung cấp dữ liệu địa lý, bản đồ địa hình và cơ sở hạ tầng với độ chính xác cao dựa trên ảnh chụp vệ tinh. Do đó, mô hình này rất cần thiết để cung cấp bản đồ 3D của các đối tượng phức tạp như khu vực đô thị hoặc miền núi. Trong những năm gần đây, các mô hình GIS đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về lựa chọn địa điểm cho các trang trại gió [34], [35], [36]. Trong nghiên cứu này, BlenderGIS và QGIS được sử dụng làm công cụ phần mềm để cung cấp bản đồ 3D của các trang trại gió. BlenderGIS và QGIS là các phần

mềm mã nguồn mở, đầy đủ tính năng và dễ sử dụng cho các nhà nghiên cứu không chuyên về bản đồ kỹ thuật số [37].

CFD là một mô hình mô phỏng chuyển động, tương tác, trao đổi nhiệt hoặc các quá trình phản ứng của chất lưu dựa trên các phương trình bảo toàn như bảo toàn khối lượng, bảo toàn động lượng và bảo toàn năng lượng. Mô hình này thường được sử dụng trong các lĩnh vực như hàng không, vũ trụ và hệ thống năng lượng. Các phương trình bảo toàn chi phối các quá trình chất lưu thường được gọi là hệ phương trình Navier-Stokes và thường được triển khai dưới dạng các phương trình vi phân từng phần. Ví dụ, bảo toàn khối lượng thường được biểu thị thông qua phương trình Liên tục; Bảo toàn động lượng được biểu thị thông qua Định luật Newton thứ 2; Bảo toàn năng lượng được biểu thị thông qua Định luật Nhiệt động lực học thứ nhất như được thể hiện trong các phương trình (2.1) - (2.3) [38], [39].

Phương trình Liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (2.1)$$

Định luật Newton thứ hai:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{U} + \vec{f}_b \quad (2.2)$$

Định luật Nhiệt động lực học thứ nhất:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau) + S_E \quad (2.3)$$

Các phương trình bảo toàn (2.1) - (2.3) thường được giải quyết thông qua khái niệm về các phương trình Navier-Stokes theo Reynolds trung bình (RANS) bằng phương pháp Mô phỏng số trực tiếp (DNS). Trong lĩnh vực năng lượng gió, dòng chảy của không khí thường là hỗn loạn. Do đó, các mô hình dòng chảy rối thường được sử dụng để xác định chính xác hơn các giá trị của tốc độ gió và áp

suất tại mỗi điểm trong không gian. Trong số đó, mô hình dòng chảy rối $k - \varepsilon$ được sử dụng phổ biến nhất và đã được nhiều nhóm nghiên cứu trước đây xác minh [39], [40]. Hệ phương trình dòng chảy rối trong mô hình này được biểu diễn như trong phương trình (2.4):

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_s - \varepsilon + f_b \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_s - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} f_b) \end{cases} \quad (2.4)$$

Trong đó: x_i là tọa độ: $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$; $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ là hằng số Prandtl; $C_{\varepsilon 1} = 1.21, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon 3} = 1.0$ là các hệ số của mô hình.

Bằng cách giải hệ phương trình (2.4), giá trị của K và l được xác định như trong phương trình (2.5) đối với dòng chảy của không khí trong lớp tiếp xúc trực tiếp với bề mặt cánh quạt [41], [42], [43]:

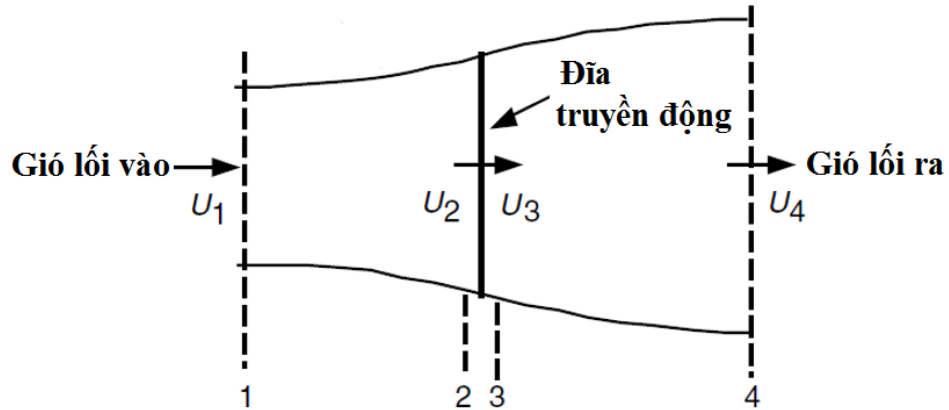
$$\begin{cases} K = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ l = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \end{cases} \quad (2.5)$$

II.2. Lý thuyết BEM and BOM

Lý thuyết xác định công suất của tuabin gió trục ngang được Betz và Glauert đề xuất vào những năm 1930. Ban đầu, các đặc tính của tuabin được xác định dựa trên lý thuyết mômen và lý thuyết phần tử cánh. Sau đó, hai lý thuyết này được kết hợp thành lý thuyết BEM. Ngày nay, lý thuyết BEM được sử dụng rộng rãi trong thiết kế khí động học và phân tích hiệu suất của rôto tuabin gió trục ngang.

Lý thuyết BEM giả định rằng luồng không khí sẽ di chuyển qua một thể tích kiểm soát, được giới hạn bởi các bề mặt hình trụ. Rôto tuabin được biểu diễn bằng một đĩa truyền động như thể hiện trong Hình 2.1. Luồng không khí di chuyển

qua thể tích kiểm soát được giả định là không nén được, đồng nhất và ổn định [44], [45].



Hình 2.1. Mô hình minh họa lý thuyết BEM.

Lý thuyết này cũng giả định rằng số lượng cánh tuabin là vô hạn, lực tác dụng đồng đều lên toàn bộ đĩa truyền động và không có sự hình thành xoáy phía sau tuabin khi quay. Xem xét hệ thống trên là kín và sử dụng định luật bảo toàn động lượng, lực tác dụng lên tuabin này có thể được xác định như trong phương trình (2.6):

$$Th = U_1(\rho A_1 U_1) - U_4(\rho A_4 U_4) \quad (2.6)$$

Trong điều kiện dòng chảy ổn định, định luật bảo toàn khối lượng cho phép xác định lưu lượng không khí như trong phương trình (2.7):

$$\dot{m} = \rho A_1 U_1 = \rho A_4 U_4 \quad (2.7)$$

Kết hợp phương trình (2.7) vào phương trình (2.6), lực tác dụng lên tuabin này có thể được xác định như trong phương trình (2.8):

$$Th = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.8)$$

Áp dụng định luật Bernoulli cho dòng không khí phía trước tuabin:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.9)$$

Áp dụng định luật Bernoulli cho dòng không khí phía sau tuabin:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.10)$$

Vì áp suất ở đầu vào và đầu ra bằng áp suất môi trường, $p_1=p_4$, nên tốc độ không khí phía trước và phía sau tuabin bằng nhau, $U_2=U_3$. Từ đó, lực tác dụng lên một phía của tuabin được xác định như trong phương trình (2.11):

$$T = A_2 (p_2 - p_3) = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.11)$$

Kết hợp phương trình (2.8) và phương trình (2.11), tốc độ gió phía sau rôto tuabin được xác định như trong phương trình (2.12):

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.12)$$

Gọi a là hệ số cảm ứng hướng trục của luồng không khí, giá trị của a được xác định thông qua sự thay đổi tốc độ gió như trong phương trình (2.13):

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.13)$$

Cuối cùng, công suất gió tác dụng lên rôto tuabin được xác định như trong phương trình (2.14):

$$P = Th \times U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2 U_1^3 4a(1-a)^2 \quad (2.14)$$

Gọi C_p là hệ số công suất, là tỷ lệ giữa công suất do tuabin tạo ra và công suất của dòng khí tự do trước khi đến mặt phẳng rôto. Giá trị của C_p được xác định như trong phương trình (2.15):

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_2 U_1^3} = 4a(1-a)^2 \quad (2.15)$$

Lấy đạo hàm từ phương trình (2.15) sẽ tìm được giá trị cực đại của C_p , $C_{pmax}=16/27$ tại $a=1/3$. Điều này có nghĩa là thiết kế rôto tuabin tốt nhất sẽ có tốc độ dòng chảy ở mặt phẳng phía trước rôto phải bằng 2/3 tốc độ dòng chảy tự do

và hiệu suất khai thác năng lượng gió cao nhất của rôto tuabin gió có thể đạt được chỉ là 59,26% [45].

Ở giai đoạn này, lực đẩy tác dụng lên rôto tuabin cũng có thể được xác định theo như sau:

$$Th = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 4a(1-a) \quad (2.16)$$

Gọi C_{Th} là hệ số lực đẩy, là tỷ lệ giữa lực đẩy trên mặt phẳng rôto tuabin và lực đẩy của dòng chảy tự do lối vào:

$$C_{Th} = 4a(1-a) \quad (2.17)$$

Công suất gió được tạo ra từ rôto tuabin sẽ được chuyển đổi thành công suất điện đầu ra thông qua các hệ thống cơ khí, hộp số và máy phát điện. Từ đây, công suất điện đầu ra của tuabin gió trực ngang có thể được xác định như trong phương trình (2.18):

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3 C_p \eta_m \eta_g \quad (2.18)$$

Trên thực tế, số lượng cánh của tuabin thương mại bị giới hạn do hạn chế về không gian lắp đặt trên HUB. Số lượng cánh phổ biến nhất là 3 cánh. Khi xem xét số lượng cánh tuabin là hữu hạn, hệ số công suất tối đa của toàn bộ rôto được xác định bằng lý thuyết Wilson như trong phương trình (2.19):

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} \times TSR \times \left[TSR + \frac{1.32 + \left(\frac{TSR-8}{20} \right)^2}{B^{2/3}} \right]^{-1} - \frac{0.57 \times TSR^2}{\frac{C_L}{C_D} \times \left(TSR + \frac{1}{2B} \right)} \quad (2.19)$$

$$TSR = \frac{\omega R}{U_1} \quad (2.20)$$

Từ phương trình (2.19), hệ số công suất tối đa của tuabin cần được xem xét liên quan đến số lượng cánh, tỉ số tốc độ đầu cánh so với đuôi cánh, và đặc biệt là tỉ số giữa hệ số lực nâng và hệ số lực cản của toàn bộ cánh. Bên cạnh đó, phương

trình (2.20) cho thấy hệ số công suất cũng phụ thuộc vào tốc độ quay của rôto trong quá trình hoạt động thực tế.

Tỉ lệ giữa hệ số lực nâng và hệ số lực cản của toàn bộ cánh phụ thuộc vào thiết kế biên dạng, góc xoắn và chiều dài của từng phần khác nhau trên cánh. Lý thuyết BOM được sử dụng để mô tả sự phụ thuộc của chiều dài, độ dày và góc xoắn của biên dạng cánh, tỉ số tốc độ đầu cánh vào chiều dài tổng thể của cánh và tổng số cánh được sử dụng để tạo thành rôto. Mỗi quan hệ này được thể hiện như trong các phương trình (2.21) - (2.22) [46], [47], [48], [49]:

- Chiều dài biên dạng cánh ở khoảng cách r từ tâm rôto được xác định như trong phương trình (2.21):

$$C(r) = \frac{16\pi R}{9B \frac{C_l}{C_d} TSR} \frac{1}{\sqrt{TSR^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (2.21)$$

- Góc xoắn của phần biên dạng cánh thứ i ở khoảng cách r từ tâm rôto được xác định như trong phương trình (2.22):

$$\beta^i(r) = \arctan\left(\frac{2R}{3rTSR}\right) - AoA_{\max}^i \quad (2.22)$$

II.3. Phương pháp PM, FIDM and LLFVWM

II.3.1. Phương pháp PM

Biên dạng của thiết kế mẫu cánh có thể được xác định thông qua các đại lượng đặc trưng như độ dày tối đa (MT), vị trí độ dày tối đa (MTP), độ cong tối đa (MC) và vị trí độ cong tối đa (MCP) như thể hiện trong Hình 2.2.

will be determined from the kinetic energy of the incoming flow with different AoAs at different points. The incoming flow function at point (x, y) is determined as in equation (2.23) [50]:

Sau khi xác định số lượng tấm thích hợp, các điểm tiếp xúc giữa các tấm và bề mặt mẫu cánh sẽ là những điểm quan trọng để xác định các quá trình tương tác của gió với bề mặt cánh. Những tương tác này sẽ được xác định từ động năng của dòng chảy tới với các góc tấn công khác nhau tại các điểm khác nhau. Hàm dòng chảy tới tại điểm (x, y) được xác định như trong phương trình (2.23) [50]:

$$\Psi(x, y) = u_{\infty}y - v_{\infty}x + \frac{1}{2\pi} \int_s \gamma(s) \ln r(s; x, y) ds + \frac{1}{2\pi} \int_s \sigma(s) \theta(s; x, y) ds \quad (2.23)$$

Trong đó: $u_{\infty} = U_1 \cos(AoA)$, $v_{\infty} = U_1 \sin(AoA)$ là các thành phần của vận tốc dòng đến tại điểm (x,y) bất kỳ dọc theo các trục ox và oy.

Các giá trị dòng xoáy tại các điểm trên bề mặt mẫu cánh được xác định như trong phương trình (2.24):

$$\gamma_i = \gamma_{0i} \cos(AoA_i) + \gamma_{90i} \sin(AoA_i) \quad (2.24)$$

Cuối cùng, hệ số lực nâng, hệ số lực cản và hệ số áp suất của mô hình mẫu cánh được xác định như trong phương trình (2.25) [50], [51]. Những đại lượng này là các tham số quan trọng để xác định hiệu quả khai thác năng lượng gió của mỗi thiết kế cánh tuabin.

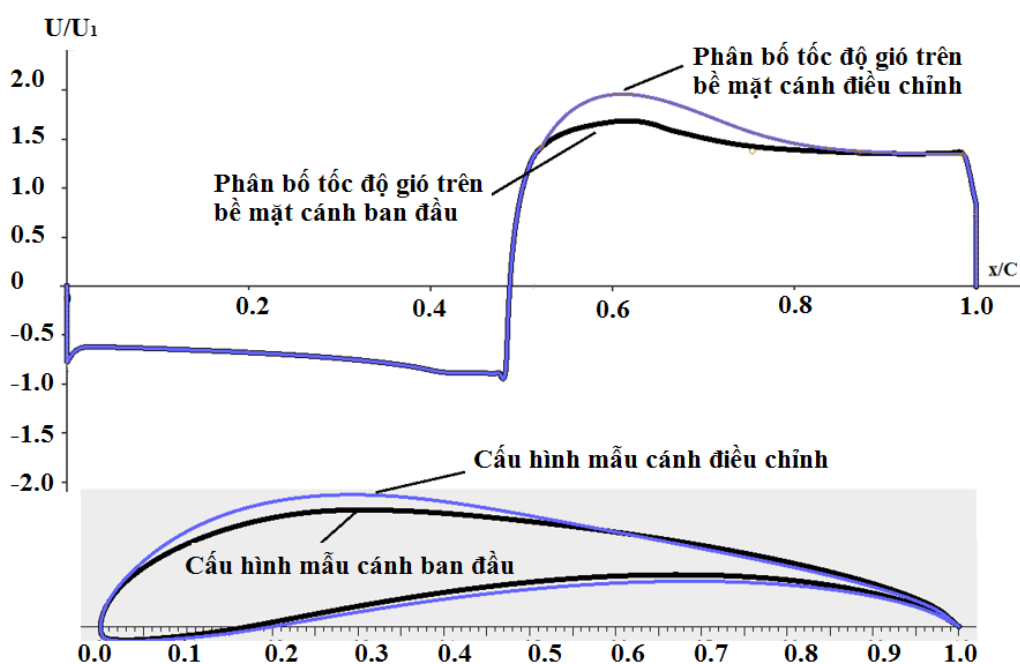
$$C_l = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_{\infty i} \gamma_i}{\frac{1}{2} \rho q_{\infty}^2} ; C_d = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i u_{\infty i} \gamma_i}{\frac{1}{2} \rho q_{\infty}^2} ; C_p = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i}{q_{\infty}} \right)^2 \quad (2.25)$$

II.3.2. Phương pháp FIDM

Khi phân tích mô hình khí động học mẫu cánh với PM được thực hiện, kết quả thu được sẽ là các giá trị của các đại lượng như thể hiện trong phương trình (2.25). Điều này có nghĩa là hình học của mẫu cánh có liên quan trực tiếp đến các đại lượng C_l , C_d và C_p . Từ đó, nếu sự phân bố của tốc độ gió trên bề mặt cánh

hoặc hàm C_p được sửa đổi, hình học của mẫu cánh tương ứng cũng sẽ thu được tương ứng, điều này được gọi là thiết kế ngược.

Phương pháp thiết kế ngược được chia thành hai loại, đó là thiết kế ngược một phần và thiết kế ngược toàn phần FIDM. Thiết kế ngược một phần cho phép chỉnh sửa phân bố tốc độ gió hoặc phân bố C_p ở bất kỳ phần nào của mẫu cánh, sau đó thiết kế lại phần tương ứng của mẫu cánh đó. Tương tự, thiết kế ngược toàn phần FIDM cho phép điều chỉnh phân bố tốc độ gió hoặc phân bố C_p của một phần hoặc toàn bộ mẫu cánh, sau đó thiết kế lại toàn bộ mẫu cánh đó. Cả hai phương pháp thiết kế ngược này đều dựa trên phương pháp ánh xạ bảo giác [50], [52]. Trong luận án này sử dụng phương pháp thiết kế ngược toàn phần FIDM. Hình 2.4 minh họa quá trình chỉnh sửa phân bố tốc độ gió trên bề mặt mẫu cánh, sau đó tạo ra cấu hình cánh mới tương ứng. Đường màu đen là giá trị của mẫu cánh ban đầu, đường màu xanh là các giá trị đã được điều chỉnh cho mẫu cánh mới.



Hình 2.4. Minh họa phương pháp FIDM đối mới mẫu cánh.

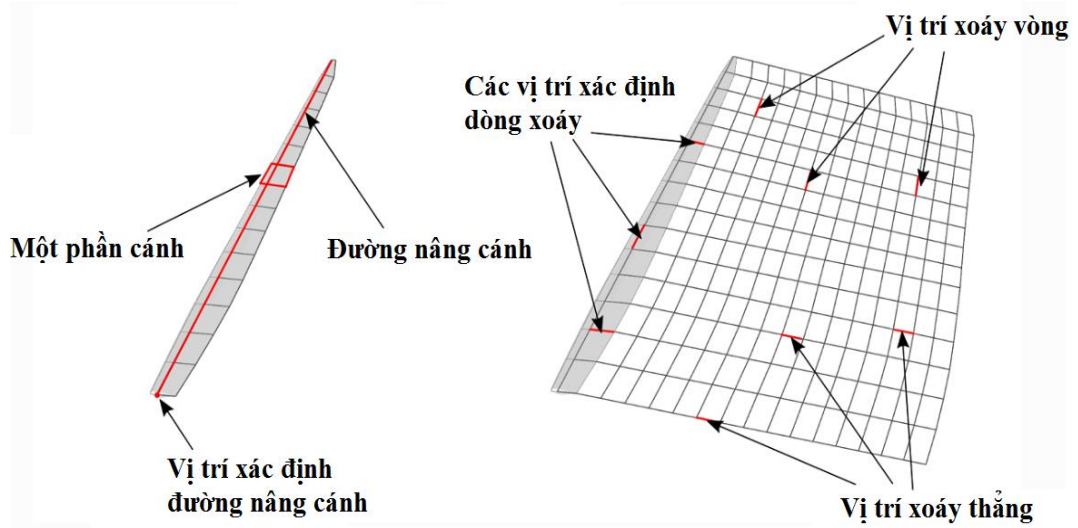
Sau khi chỉnh sửa phân bố tốc độ gió hoặc phân bố C_p kết thúc, mẫu cánh mới tương ứng sẽ được tạo ra, nhưng các thông số của mẫu cánh mới có thể chưa đáp ứng yêu cầu cần thiết. Để hoàn thiện các thông số của mẫu cánh mới, các giá trị MT, MTP, MC và MCP có thể được thay đổi bằng cách nhập các giá trị số

chính xác. Sau đó, tất cả các mô hình mẫu cánh mới sẽ được phân tích sơ bộ bằng phương pháp PM để tìm ra mô hình mẫu cánh có C_l/C_{dmax} lớn nhất. Cuối cùng, các mẫu cánh có C_l/C_{dmax} sẽ được kiểm tra lại bằng các mô hình phân tích CFD để thu được các kết quả có độ chính xác cao hơn.

II.3.3. Phương pháp LLFVWM

Qblade là một phần mềm đa vật lý, được sử dụng rộng rãi trong thiết kế sơ bộ hệ thống tuabin gió trục ngang và trục đứng cả trên bờ và ngoài khơi. Phần mềm Qblade sử dụng phương pháp LLFVWM để xác định các thông số khí động học của toàn bộ cánh tuabin. Không giống như trong phương pháp BEM truyền thống, phương pháp LLFVWM sẽ mô hình hóa rõ ràng hiệu ứng dòng xoáy của rôto thông qua các phần tử xoáy Lagrangian. Do đó, kết quả phân tích ảnh hưởng của dòng xoáy lên rôto bằng phương pháp LLFVWM cho độ chính xác cao hơn so với phương pháp BEM [53]. Các thiết kế mẫu cánh tốt sau khi được tạo ra từ phương pháp FIDM sau đó sẽ được đưa vào Qblade để thiết kế ra một cánh tuabin hoàn chỉnh.

Trong phần mềm Qblade, các mẫu cánh sẽ được chia thành các phần tương ứng với mô hình biên dạng cánh và kích thước theo các thiết kế cụ thể khác nhau. Ban đầu, các lực tác dụng lên toàn bộ cánh sẽ được xác định bằng phương pháp LLFVWM thông qua dữ liệu cực biên dạng cánh hai chiều, và các lực tách ra từ cánh sẽ được giải quyết rõ ràng. Dữ liệu cực biên dạng cánh hai chiều sẽ được xác định bằng phương pháp PM [50] cho một phạm vi giá trị góc tấn công (AoA) được chỉ định, và sau đó được ngoại suy đến toàn bộ góc 360°. Mô hình phân tích cánh tuabin trong phần mềm Qblade được thể hiện trong Hình 2.5.



Hình 2.5. Minh họa phương pháp LLFVWM đối với cánh tuabin [53]

Mỗi cánh quạt sẽ được biểu diễn bằng một đường nâng nằm ở phần tư dây cung của mô hình mẫu cánh 2D. Toàn bộ cánh quạt sẽ được chia thành một số lượng tám, mỗi tám được biểu diễn bằng một vòng xoáy bao gồm bốn sợi xoáy thẳng như được hiển thị trong Hình 2.5. Độ tuần hoàn của các đường xoáy liên kết được tính toán từ vận tốc dòng chảy vào tương đối. Hệ số lực nâng và hệ số lực cản được lấy từ dữ liệu phân tích PM của mẫu cánh trước đó được lập thành bảng. Độ tuần hoàn theo mặt cắt được tính toán theo định lý Kutta-Joukowski, sau đó lực nâng mặt cắt thứ i tại một góc AoA bất kỳ được xác định bằng phương trình (2.26) [53]:

$$\partial F_{Li} (AoA) = \rho V_{rel} \partial \Gamma_i \quad (2.26)$$

Sau đó, các đặc tính khí động học của toàn bộ cánh quạt như lực nâng, lực cản và các hiệu ứng thứ cấp khác sẽ được xác định chi tiết thông qua một số mô hình toán học khác nhau như OYE hoặc IAG. Trước đây, mô hình mô tả hiện tượng không ổn định động trong Qblade có thể được thực hiện bằng cách sử dụng LLFVWM không ổn định hoặc BEM thông qua Mô hình OYE. Tuy nhiên, mô hình này chỉ tính toán động lực học của dòng chảy tách rời của cánh. Ngoài ra, giá trị AoA chỉ được xác định trong phạm vi từ -50° đến 50° . Gần đây, mô hình dòng xoáy động IAG đã được phát triển và sử dụng rộng rãi. Mô hình này thay thế các mô hình trước đó trong Qblade. Trong nghiên cứu mới nhất của nhóm, các

tác giả đã đề xuất một mô hình toán học IAG được cải tiến và so sánh nó với các mô hình và thí nghiệm khác dựa trên các mô hình cánh khác nhau như S801, S809 và S814. Mô hình IAG trong không gian trạng thái sẽ chia dòng chảy thành ba trạng thái: dòng chảy bám dính, dòng chảy tách rời và trạng thái nâng xoáy. Cuối cùng, hệ số lực nâng và hệ số lực cản của các phần cánh trong không gian được xác định theo phương trình (2.27) và (2.28) [54]:

$$C_{Li}^D = C_{Ni}^D \cos(AoA_i) - C_{Ti}^D \sin(AoA_i) \quad (2.27)$$

$$C_{Di}^D = C_{Di}^{VI} + (AoA_i - AoA_{ei}) C_{Ni}^C + (C_{Di}^{VI} - C_{D0}^{VI}) \left[\left(\frac{1 - \sqrt{x_4(t)}}{2} \right)^2 - \left(\frac{1 - \sqrt{f^{VI}}}{2} \right)^2 \right] + x_5(t) \sin \alpha_i \quad (2.28)$$

Ở đây: $C_{Ni}^D = C_{Ni}^f + C_{Ni}^V$ là thành phần lực pháp tuyến; $C_{Ti}^D = C_T^{VI}(AoA_{fi})$ là thành phần lực tiếp tuyến; $C_{Di}^{VI}, C_{D0}^{VI}, f^{VI}$ là các giá trị tĩnh của hệ số lực cản, mức độ cản ở góc AoA có lực pháp tuyến bằng 0 và vị trí tách rời tĩnh, tương ứng; $x_4(t)$ là điểm tách rời mép sau không ổn định; $x_5(t)$ là lực pháp tuyến do hiệu ứng nâng xoáy gây ra.

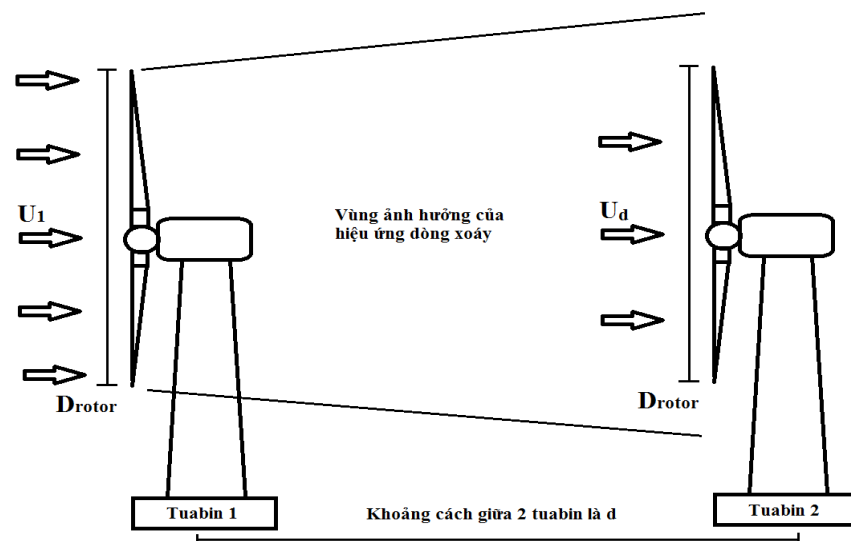
Kết quả nghiên cứu được nhóm này công bố cho thấy mô hình IAG hiện tại trong phần mềm Qblade đã giúp khắc phục những hạn chế của các mô hình trước đây liên quan đến hiện tượng không ổn định động của các dạng biên dạng cánh. Mô hình mới này có thể bao quát được ảnh hưởng của các thông số dòng chảy không ổn định, độ dày biên dạng cánh, sự thay đổi lớn về số Reynolds, sự thay đổi góc tấn từ -180° đến 180° và cả vấn đề độ nhám bề mặt của các mô hình biên dạng cánh. Do đó, kết quả phân tích khí động học của cánh quạt tuabin gió sử dụng phần mềm Qblade có độ chính xác và độ tin cậy cao hơn so với việc chỉ sử dụng lý thuyết BEM truyền thống.

Các mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin hoàn chỉnh sau khi được thiết kế và phân tích trong Qblade sẽ tìm ra được thiết kế nào cho hiệu quả khai thác năng lượng gió cao nhất trong vùng tốc độ gió đang quan tâm. Sau đó, các thiết

kế này cũng có thể được phân tích kiểm chứng lại bằng phương pháp CFD để thu được kết quả có độ chính xác cao hơn. Cuối cùng, các thiết kế cánh tuabin mới có thể được sử dụng để tính toán thiết kế cấu hình lắp đặt trong các trang trại điện gió cụ thể.

II.4. Lý thuyết Jensen, AEP, WL và LCOE

Sau khi xác định được vị trí và diện tích của trang trại gió, các tuabin sẽ được lắp đặt theo các cấu hình khác nhau tùy thuộc vào các yếu tố như địa hình, cơ sở hạ tầng, tốc độ gió, tần suất tốc độ gió và hướng gió chính. Một số vấn đề cần được xem xét cân trọng bao gồm loại tuabin phải phù hợp với tiềm năng năng lượng gió và cách bố trí các tuabin này để giảm thiểu ảnh hưởng lẫn nhau trong quá trình hoạt động. Trong số đó, hiệu ứng dòng xoáy là mối quan ngại lớn nhất. Sự mất mát năng lượng gió do hiệu ứng dòng xoáy có thể đến từ độ gồ ghề của bề mặt địa hình hoặc từ hoạt động của các tuabin. Lý thuyết tính toán hiệu ứng dòng xoáy nhằm mục đích xác định ảnh hưởng đến công suất đầu ra của các tuabin khi khoảng cách giữa chúng khác nhau. Khi các cánh của tuabin phía trước quay, nó sẽ tạo ra dòng nhiễu động phía sau. Vùng nhiễu động này dần dần mở rộng theo khoảng cách phía sau tuabin đó như thể hiện trong Hình 2.6. Nhiễu động sẽ gây ra sự gia tăng cường độ nhiễu loạn và làm giảm tốc độ dòng khí đến các tuabin phía sau [55].



Hình 2.6. Minh họa hiệu ứng dòng xoáy gây ra bởi tuabin

Khi xem xét hiệu ứng dòng xoáy đối với các tuabin phía sau, hai thành phần đóng góp chính là sự thiếu hụt tốc độ gió và cường độ nhiễu loạn. Tốc độ gió tại các vị trí khác nhau này bị ảnh hưởng bởi luồng gió xoáy do cả tuabin phía trước và độ dốc địa hình gây ra. Rõ ràng, giá trị của U_d có thể được xác định thông qua một số giả định gần đúng về loại địa hình và loại tuabin. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, các giá trị chính xác của U_d sẽ được xác định bằng một phương pháp hiện đại dựa trên mô hình GIS - CFD kết hợp. Phương trình cân bằng giữa mômen xoáy và sự thiếu hụt tốc độ gió bị gây ra bởi tuabin được xác định theo lý thuyết Jensen như trong phương trình (2.29) [56], [57]:

$$U_d = U_1 \left[1 - \frac{a}{\alpha_d \frac{d}{D_{\text{rotor}}}} \right] \quad (2.29)$$

Vì mỗi khu vực có độ dốc địa hình khác nhau, nên tốc độ thay đổi của tỉ lệ thay đổi của tốc độ gió theo độ dốc địa hình (r_{cw}) cần được xác định bằng phương pháp GIS - CFD kết hợp. r_{cw} là tỉ lệ thay đổi của tốc độ gió do độ nhám bề mặt của địa hình trang trại gió gây ra. Một khu vực địa hình nhất định sẽ có một hàm của r_{cw} dọc theo hướng gió chính (dọc theo các hàng tuabin). Dựa trên hàm của r_{cw} , sự thay đổi tốc độ gió tại các vị trí khác nhau trong cùng một hàng có thể được xác định. Từ đó, chỉ cần xác định tốc độ gió tại một điểm trong khu vực trang trại thì có thể sử dụng để nội suy tốc độ gió tại các điểm khác. Điều này giúp xác định chính xác tốc độ gió tại mỗi điểm dự kiến lắp đặt tuabin trong khu vực trang trại. Hàm r_{cw} có thể được xác định bằng các phép đo thực nghiệm hoặc sử dụng phương pháp mô phỏng GIS-CFD. Trong luận án này, r_{cw} được xác định bằng mô hình GIS - CFD. Đối với một khu vực địa hình, chỉ cần xây dựng mô hình GIS - CFD một lần bằng cách sử dụng tốc độ gió trung bình để xác định hàm r_{cw} . Tốc độ gió phía sau tuabin ở một khoảng cách sẽ được hiệu chỉnh với r_{cw} tương ứng để có thể bao hàm cả ảnh hưởng từ bề mặt địa hình như thể hiện trong phương trình (2.30):

$$U_d = r_{cw} U_1 \left[1 - \frac{a}{\alpha_d \frac{d}{D_{rotor}}} \right] \quad (2.30)$$

Sau đó, độ thiếu hụt tốc độ gió (VD) tại điểm d phía sau rôto đầu tiên được xác định như trong phương trình (2.31):

$$VD = \left(1 - \frac{U_d}{U_1} \right) \times 100\% = \left(\frac{a}{\alpha_d \frac{d}{D_{rotor}}} \right) \times 100\% \quad (2.31)$$

Với: α_d hệ số khuếch tán của không khí, $\alpha_d = 0.075$ đối với các trang trại điện gió trên bờ [57].

Thông thường, các tuabin thường được lắp đặt theo hàng và mỗi trang trại sẽ có nhiều hàng tuabin tùy thuộc vào điều kiện thực tế. Sản lượng điện hàng năm của các tuabin cũng có thể được xác định theo phương trình (2.32) [58], [59]:

$$AEP = 8760 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Pe_j^i \times f_j^i) \quad (2.32)$$

Ở đây: n là số hàng tuabin; m là số khoảng chia của tốc độ gió đến; Pe_j^i là công suất điện lõi ra của tuabin đối với khoảng tốc độ gió thứ j tại hàng thứ i, kW; f_j^i là giá trị của hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull tại khoảng tốc độ gió thứ j và tại hàng tuabin thứ i.

Hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull được biểu thị như trong phương trình (2.33):

$$f(U) = \left(\frac{W}{S} \right) \left(\frac{U}{S} \right)^{W-1} \exp \left(- \left(\frac{U}{S} \right)^W \right) \quad (2.33)$$

Với W và S lần lượt là tham số độ rộng và tham số quy mô của hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull.

Tham số gây ra sai số lớn nhất cho AEP là tần số tốc độ gió. Do đó, sai số của AEP sẽ được xác định bằng phương pháp truyền sai số thông qua công suất điện đầu ra và hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull như sau:

$$\Delta AEP = 8760 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\Delta P e_j^i f_j^i + P e_j^i \Delta f_j^i) \quad (2.34)$$

Với:

$$\Delta P e_j^i = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \eta_m \eta_g 3 (U_j^i)^2 \Delta U_j^i \quad (2.35)$$

$$\Delta f_j^i = \frac{W}{S^2} \text{Exp} \left(- \left(\frac{U_j^i}{S} \right)^W \right) \left[(W-1) \left(\frac{U_j^i}{S} \right)^{W-2} - W \left(\frac{U_j^i}{S} \right)^{2(W-1)} \right] \Delta U_j^i \quad (2.36)$$

Ở đây: ΔAEP là sai số tuyệt đối của AEP, kWh/năm; Δf_j^i là sai số tuyệt đối của tần số tốc độ gió tại HUB của tuabin (i,j); ΔU_j^i là sai số tuyệt đối của tốc độ gió tại HUB của tuabin (i,j), m/s.

Cuối cùng, tổn thất dòng xoáy có thể được xác định như trong phương trình (2.37):

$$WL = \left(1 - \frac{AEP}{AEP_{no-wake}} \right) \times 100\% \quad (2.37)$$

Ở đây: AEP và $AEP_{no-wake}$ là sản lượng điện hàng năm khi có xét đến hiệu ứng dòng xoáy và không xét đến hiệu ứng dòng xoáy tương ứng.

Vấn đề tiếp theo liên quan đến chi phí năng lượng bình quân LCOE. LCOE là một thông số quan trọng để các nhà đầu tư đưa ra quyết định đầu tư vào bất kỳ dự án điện gió nào. Ngoài ra, các nhà quản lý thị trường điện tại Việt Nam như EVN cũng cần dựa vào LCOE thực tế để tư vấn cho Bộ Công Thương ban hành giá mua bán điện cho các Thỏa thuận mua bán điện. Các mô hình tính toán LCOE cần xem xét nhiều yếu tố như tiền thuê đất, mua thiết bị, vận chuyển, lắp đặt, vận hành, bảo trì, vv... Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã công bố cho thấy chi phí nên được chia thành hai phần: chi phí vốn đầu tư (CapEx) và chi phí vận hành (OpEx). Tỷ lệ chiết khấu cũng là một thông số ảnh hưởng đến LCOE. Tuy nhiên, đối với

các dự án đầu tư tại Việt Nam thì tỉ lệ này tương đối ổn định và ảnh hưởng không lớn trong các tính toán với LCOE. Giá trị LCOE cho một trang trại điện gió trên bờ có thể được xác định như trong phương trình (2.38) [60], [61]:

$$LCOE = \frac{CapEx + \sum_{i=1}^T OpEx_i (1 + rd)^{-i}}{\sum_{i=1}^T AEP_i (1 + rd)^{-i}} \quad (2.38)$$

II.5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án này sử dụng sự kết hợp giữa các phương pháp vật lý và thống kê làm cơ sở cho các tính toán phân tích và mô hình mô phỏng số. Các mô hình này sẽ được kết hợp để tạo ra các mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt trong các trang trại điện gió. Các tính năng mạnh mẽ của các phương pháp sẽ được khai thác thông qua các mô hình cụ thể được đề xuất trong luận án. Ngoài ra, một số phương pháp khác cũng được sử dụng để hỗ trợ việc xây dựng các mô hình thiết kế, cụ thể bao gồm:

- Phương pháp tìm kiếm, thu thập và xử lý thông tin và dữ liệu trực tuyến: Phương pháp này được sử dụng để giải quyết các vấn đề liên quan đến nguồn dữ liệu như đặc điểm địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió, thông số thiết kế của tuabin; cơ sở lý thuyết của các lý thuyết BEM, BOM, AEP, WL và LCOE; cơ sở lý thuyết và thư viện dữ liệu của các mô hình phân tích GIS, CFD, PM, FIDM, LLFVWM.

- Phương pháp xây dựng bản đồ số: Các đặc điểm của địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió trong các khu vực quan tâm sẽ được xây dựng và hiển thị trên bản đồ số dựa trên các công cụ phần mềm BlenderGIS và QGIS hoặc Ansys CFX và Fluent. Từ đó, tạo ra các mô hình 2D, 3D của các đối tượng cần nghiên cứu, đánh giá, lựa chọn các vị trí phù hợp nhất.

- Phương pháp mô phỏng kỹ thuật số: Các mô hình 2D, 3D của khu vực trang trại điện gió trên bờ sẽ được sử dụng để mô phỏng các quá trình tương tác gió trong các điều kiện khác nhau. Từ đó, các quá trình tương tác, ảnh hưởng của

các xoáy gió và tổn thất năng lượng khi gió thổi qua các khu vực này sẽ được xác định. Các kết quả này sẽ được sử dụng để tính toán các thông số vận hành của các tuabin khác nhau nhằm đánh giá và lựa chọn vị trí tối ưu nhất để lắp đặt tuabin trong các khu vực khảo sát.

- Phương pháp tính toán phân tích:

+ Các lý thuyết BEM, BOM kết hợp với các mô hình PM, FIDM, LLFVWM, CFD được sử dụng để nghiên cứu và thiết kế các biên dạng cánh tuabin gió tối ưu theo đặc điểm địa hình và nguồn gió trong các khu vực khảo sát. Từ đó, các thiết kế biên dạng cánh tuabin tối ưu phù hợp nhất cho các khu vực khảo sát sẽ được xác định.

+ Các lý thuyết BEM, Jensen, Weibull kết hợp với các mô hình GIS, CFD được sử dụng để nghiên cứu các cấu hình lắp đặt tuabin tối ưu trong các khu vực phát triển trang trại điện gió nhằm thu được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý. Cuối cùng, các cấu hình lắp đặt tuabin tối ưu cho toàn bộ khu vực phát triển trang trại điện gió sẽ được xác định.

Tóm lại:

Luận án này sử dụng các lý thuyết vật lý và thống kê như định luật bảo toàn khối lượng, năng lượng, động lượng thông qua các phương pháp BEM, BOM, Jensen, Weibull để tính toán các thông số khí động học của cánh tuabin và các giá trị AEP, WL, LCOE cho các trang trại điện gió.

Mô phỏng số và các mô hình phân tích như GIS, CFD, PM, FIDM, LLFVWM được sử dụng để thực hiện các giai đoạn xây dựng mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt tuabin của các trang trại điện gió trên bờ.

CHƯƠNG III. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ BIÊN DẠNG CÁNH TUABIN ĐIỆN GIÓ

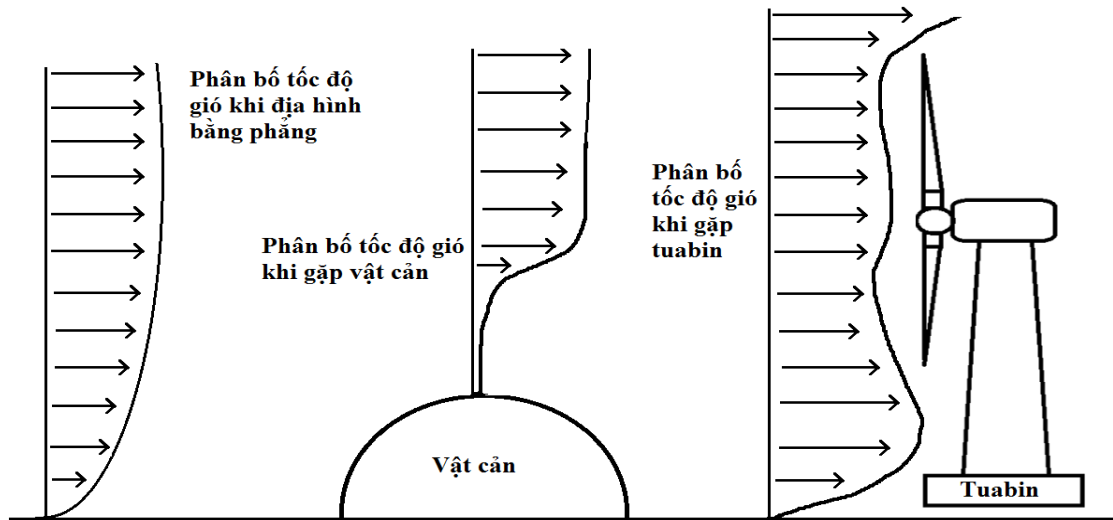
III.1. Thay đổi của tốc độ gió theo địa hình và độ cao

Việt Nam có lãnh thổ trải dài từ Bắc xuống Nam, địa hình chủ yếu là đồi núi. Độ cao địa hình tăng dần từ Đông sang Tây. Hướng gió thay đổi theo mùa và theo vùng, hướng gió thổi vào đất liền chủ yếu từ Tây Nam và Đông Nam, đôi khi từ Đông Bắc.

Khi luồng không khí chuyển động, đặc điểm của nguồn gió sẽ phụ thuộc rất nhiều vào địa hình. Vì không khí là một loại chất lưu, nên các đặc tính và hình dạng của chất lưu nói chung phụ thuộc vào môi trường xung quanh. Luồng không khí chuyển động sẽ liên tục thay đổi trạng thái với ba dạng: dòng chảy tầng, dòng chảy chuyển tiếp và dòng chảy rối. Ở mỗi trạng thái, các đặc tính quan trọng như hướng, lưu lượng, mật độ, độ nhớt, vv... sẽ thay đổi liên tục tương ứng. Do đó, với cùng nguồn gió ban đầu, nhưng khi di chuyển đến các khu vực địa hình khác nhau, hầu hết các đặc tính của chúng sẽ thay đổi. Vì vậy, cần phải nghiên cứu chi tiết và cụ thể cho từng khu vực theo đặc điểm địa hình và nguồn gió địa phương để đảm bảo tất cả các quá trình xảy ra được tính toán trước và đảm bảo các tuabin sẽ khai thác năng lượng hiệu quả nhất trong suốt vòng đời hoạt động của các trang trại gió.

Để mô tả chính xác các quá trình dòng chảy không khí, cần làm rõ một số thông số ban đầu quan trọng như: Hướng, tốc độ và cường độ nhiễu loạn của dòng chảy tới; Lớp vật liệu bao quanh, tiếp xúc trực tiếp với dòng chảy, thường được gọi là Lớp Biên. Tại bề mặt tiếp xúc với Lớp Biên, tốc độ dòng chảy sẽ bằng 0. Độ nhám của Lớp Biên sẽ ảnh hưởng lớn đến sự hình thành ma sát với lớp không khí tiếp xúc trực tiếp, do đó tạo ra các vùng dòng chảy rối, xoáy và ngược chiều như minh họa trong Hình 3.1. Điều này dẫn đến tổn thất năng lượng dòng chảy và các vấn đề khác như rung động (vấn đề mỏi), tiếng ồn (vấn đề sức khỏe) đối với tuabin trong quá trình hoạt động. Cần phải xác định rõ chiều rộng của vùng

tương tác này để tránh những tác động và tổn thất không cần thiết đến hoạt động thực tế của các tuabin.



Hình 3.1. Minh họa quá trình thay đổi phân bố tốc độ gió khi gặp vật cản

Trên thực tế, các tuabin gió thường được đặt ở độ cao trên 100 m so với mặt đất, do đó cần xác định các hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao càng chính xác càng tốt. Sự phân bố tốc độ gió ở các độ cao và địa hình khác nhau thường được mô tả bằng hàm tỉ lệ tốc độ gió Hellmann như được thể hiện trong phương trình (3.1) [45]:

$$\frac{U_h}{U_{h_0}} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

Các giá trị của hệ số Hellmann thay đổi theo các loại địa hình khác nhau trên một phạm vi rộng. Nếu xem xét tại mỗi điểm trong một phạm vi hẹp, cần phải sử dụng các hệ thống đo lường thực tế hoặc các mô hình mô phỏng số CFD để xác định các giá trị hệ số Hellmann chính xác.

Ngoài ra, dòng chảy của gió thường tồn tại ở trạng thái hỗn loạn. Trạng thái dòng chảy hỗn loạn được đặc trưng bởi cường độ chảy rối như được định nghĩa trong các phương trình (3.2) - (3.4) [45]:

$$TI = \frac{\sigma_{\bar{U}}}{\bar{U}} \quad (3.2)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} u_i \quad (3.3)$$

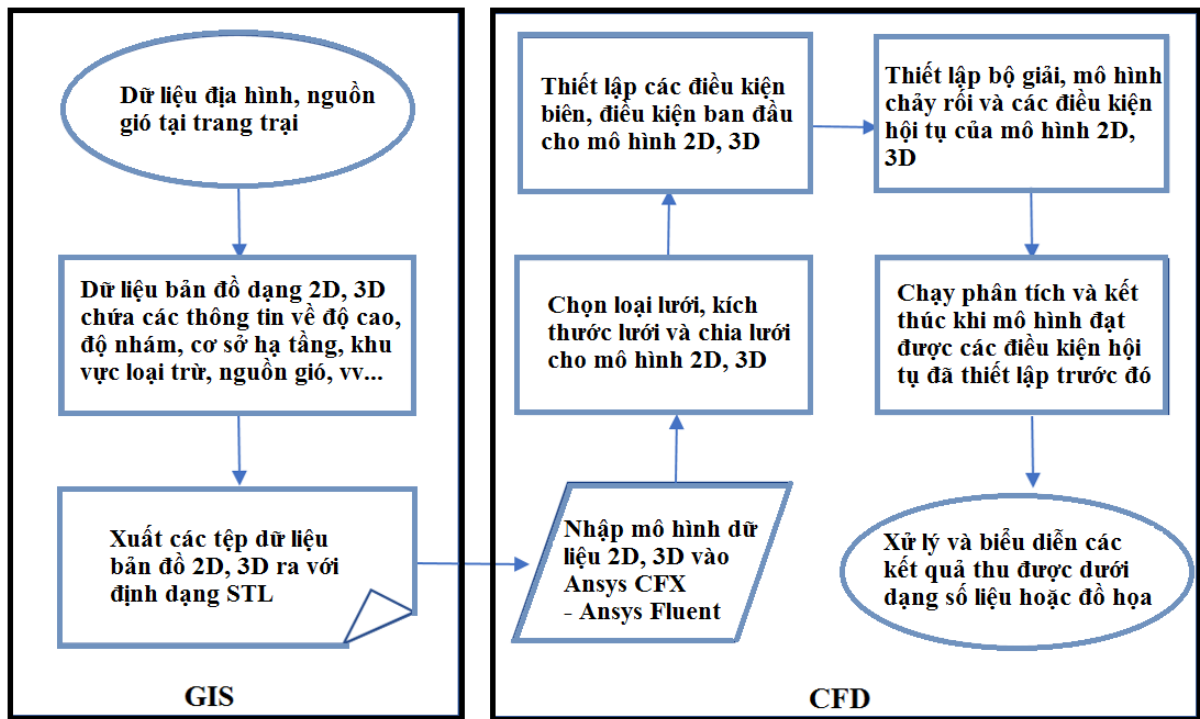
$$\sigma_{\bar{U}} = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - \bar{U})^2} \quad (3.4)$$

Trong đó: N_s là số lần ghi đo dữ liệu; u_i là tốc độ gió được ghi lại ở mỗi lần đo, m/s.

Lãnh thổ Việt Nam chủ yếu là đồi núi, với sự chênh lệch độ cao lớn. Do đó, cần phải tiến hành nghiên cứu cho từng khu vực nơi dự kiến xây dựng trang trại gió để xác định sự phân bố tốc độ gió chính xác nhất.

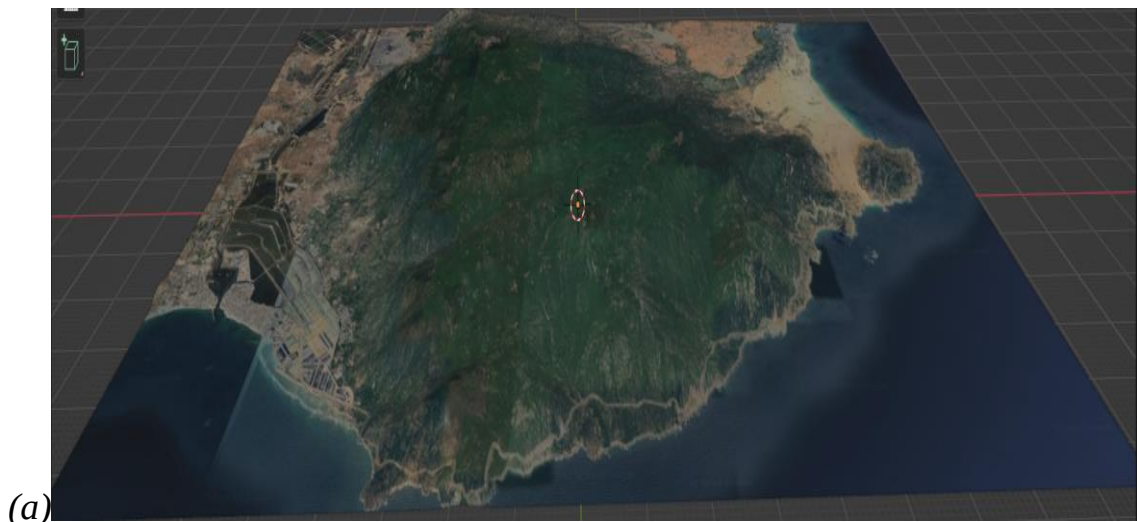
Trong nghiên cứu này, khu vực đồi núi xã Ninh Phước, giáp ranh hai tỉnh Ninh Thuận và Bình Thuận cũ, nơi có nguồn gió lớn, được chọn để xây dựng mô hình lựa chọn vị trí trang trại gió. Để mô hình hóa chính xác địa hình khu vực này, cần sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh Google Earth và dữ liệu độ cao địa hình số (DEM). Các dữ liệu này được tích hợp vào phần mềm BlenderGIS hoặc QGIS. Các phần mềm này sẽ được sử dụng để thu thập và tạo dữ liệu bản đồ địa hình 2D hoặc 3D của khu vực này. Sau đó, bản đồ địa hình 3D sẽ được chuyển đổi sang định dạng phần mềm Ansys CFX hoặc Fluent để thực hiện thiết lập điều kiện biên, điều kiện ban đầu, mô hình chảy rối và phân tích các đại lượng khí động học dựa trên phương pháp CFD. Quá trình tương tác của dòng chảy tới với các chướng ngại vật địa hình sẽ được thể hiện bằng hình ảnh, đồ thị, hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao tại các điểm khác nhau như thung lũng, sườn dốc, đỉnh núi, vv... Từ đó, chúng ta có thể xác định vị trí tốt nhất để lựa chọn và lắp đặt tuabin gió.

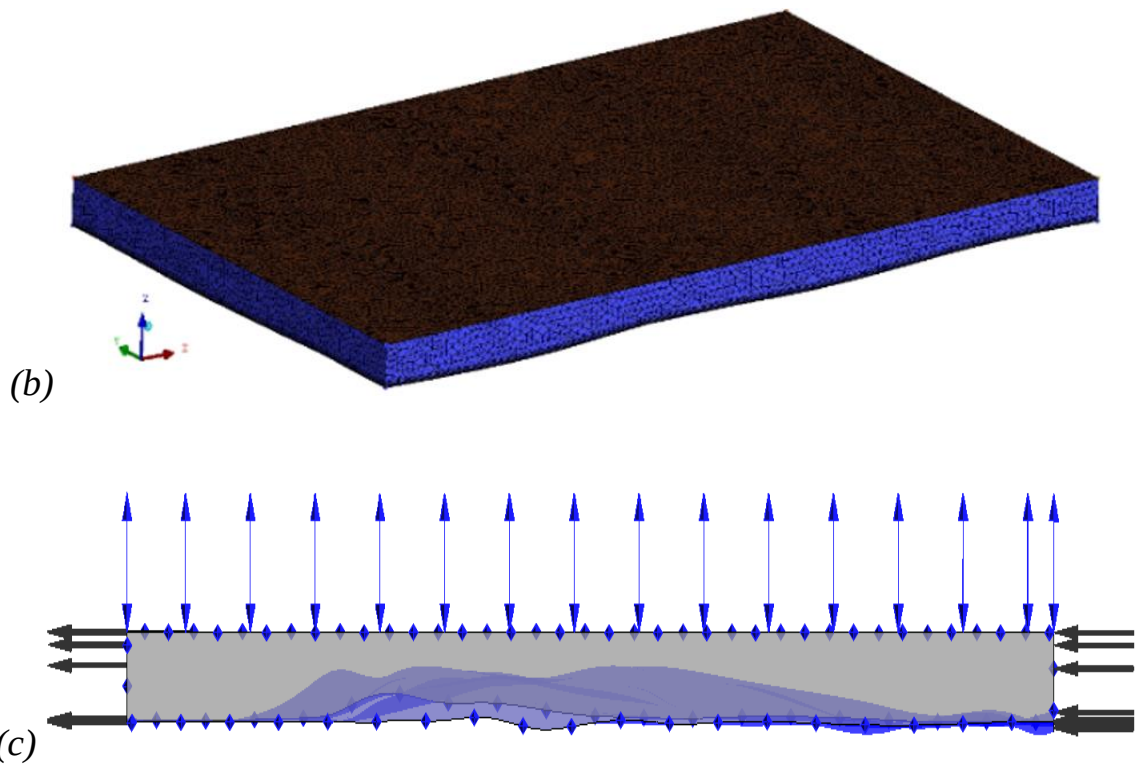
Sơ đồ phân tích đặc điểm địa hình và tài nguyên gió trong khu vực tương ứng với trang trại gió được thể hiện trong Hình 3.2.



Hình 3.2. Sơ đồ phân tích đặc trưng địa hình và nguồn gió.

Theo các bước trong Hình 3.2, dữ liệu địa hình và cơ sở hạ tầng của khu vực xã Ninh Phước được mô hình hóa bằng phần mềm BlenderGIS, sau đó được chuyển sang phần mềm Ansys CFX để hoàn thiện. Mô hình có định dạng là hình chữ nhật với chiều rộng 12.040 m, chiều dài 16.882 m và chiều cao 936 m so với mực nước biển như thể hiện trong Hình 3.3.

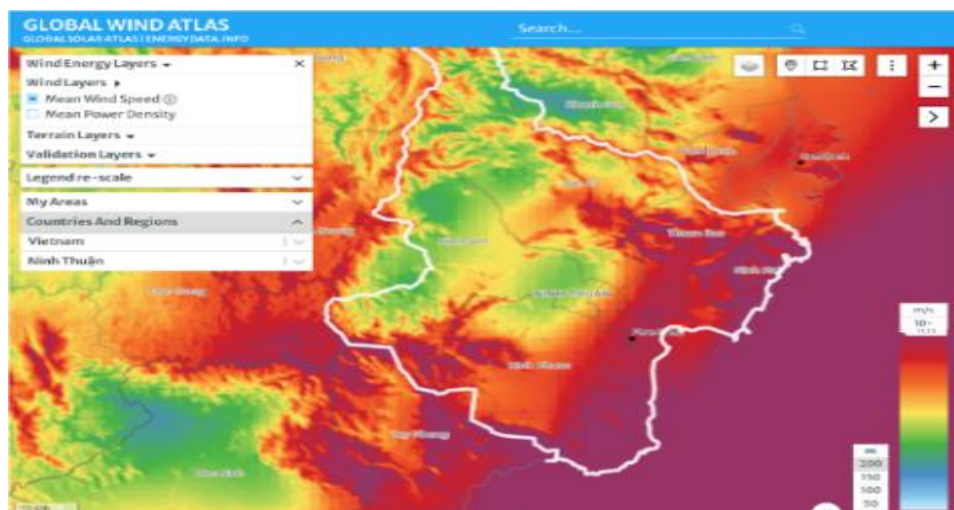




Hình 3.3. Mô hình hóa địa hình khu vực phát triển trang trại gió trên
BlenderGIS (a) và Ansys CFX (b), (c)

Sau đó, mô hình được chia thành các không gian nhỏ hơn để áp dụng các phương pháp giải số. Kích thước lưới chia là 200 m, có nghĩa là độ phân giải không gian trên mặt phẳng ngang là 200 m. Loại lưới được sử dụng là sự kết hợp giữa lưới tứ giác và lưới lục giác. Lớp lưới biên tiếp xúc với mặt đất có độ dày 10 m, mỗi lớp tiếp theo có độ dày gấp 1,2 lần lớp trước đó, tổng số lớp biên là 5 lớp. Tổng số lưới của mô hình này là 384.766 lưới, chất lượng lưới của toàn bộ mô hình khoảng 0,85.

Để xác định điều kiện ban đầu của phân bố tốc độ gió cho mô hình, dữ liệu do Ngân hàng Thế giới cung cấp ở độ cao 10 m, 50 m, 100 m, 150 m và 200 m đã được sử dụng. Đây là nguồn dữ liệu được trình bày dưới dạng Lớp bản đồ và được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu năng lượng gió toàn cầu. Các dữ liệu này được hiển thị trong Hình 3.4 và Bảng 3.1 [62].



Hình 3.4. Dữ liệu tài nguyên gió do Ngân hàng Thế giới cung cấp

Bảng 3.1. Phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao ở khu vực Ninh Phước

STT	h, m	$\bar{U}$, m/s
1	10	8.2
2	50	9.5
3	100	10.4
4	150	10.9
5	200	11.3

Đánh giá độ tin cậy của mô hình:

Theo tài liệu tham khảo [63], Phòng thí nghiệm Pacific Northwest National Laboratory đã tiến hành đo đặc điểm tài nguyên gió từ ngày 16 tháng 11 năm 2010 đến ngày 21 tháng 3 năm 2012 ở Đông bắc Oregon. Dự án này đã cung cấp dữ liệu thực nghiệm về tốc độ gió và hướng gió trong khu vực địa hình phức tạp này, theo độ cao của lớp ranh giới khí quyển. Các phép đo sử dụng máy đo gió, cánh quạt và máy siêu âm được gắn trên một tháp cao 62 m và một radar phân tích gió để thu thập và xử lý dữ liệu. Vị trí tọa độ của tháp này là (45,9551°N, -118,6877°W) như được đánh dấu trong Hình 3.5. Dữ liệu về tài nguyên gió và địa hình của khu vực này rất đầy đủ, vì vậy khu vực này đã được chọn để đánh giá độ tin cậy của phương pháp được đề xuất.

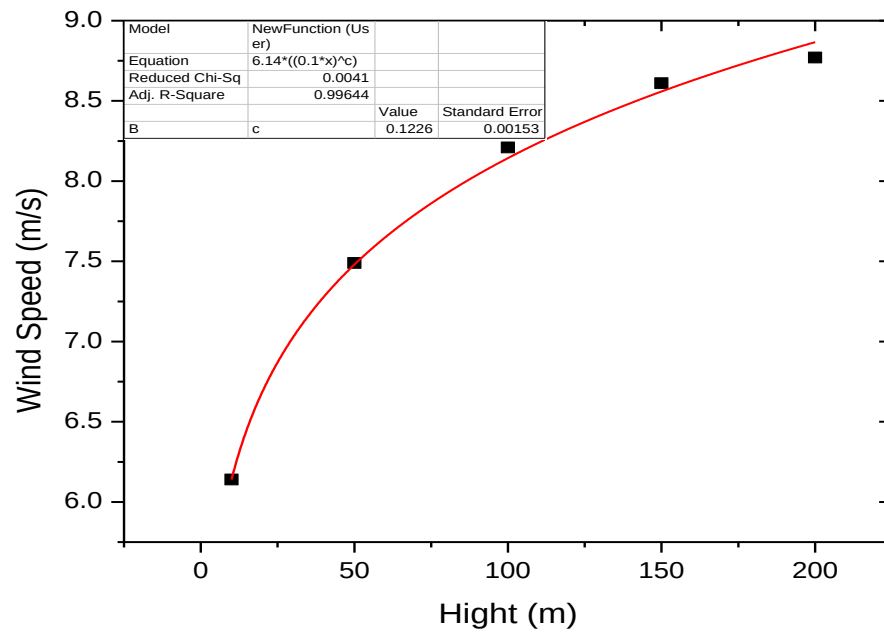


Hình 3.5. Địa hình của khu vực xung quanh tọa độ (45.9551°N, -118.6877°W)

Theo các bước trong Hình 3.2, dữ liệu địa hình của khu vực xung quanh tọa độ (45.9551°N, -118.6877°W) đã được thu thập trong BlenderGIS và các điều kiện biên và điều kiện ban đầu trong Ansys CFX được thiết lập tương tự như trong Hình 3.3. Các tham số này đã được sử dụng trong một số nghiên cứu đã được công bố trước đây [64], [65]. Mô hình này có tổng cộng 994.735 phần tử và 210.697 nút. Sử dụng cấu hình máy tính với bộ xử lý core i7 và RAM 128Gb, thời gian chạy phân tích là khoảng 30 phút cho một mô hình.

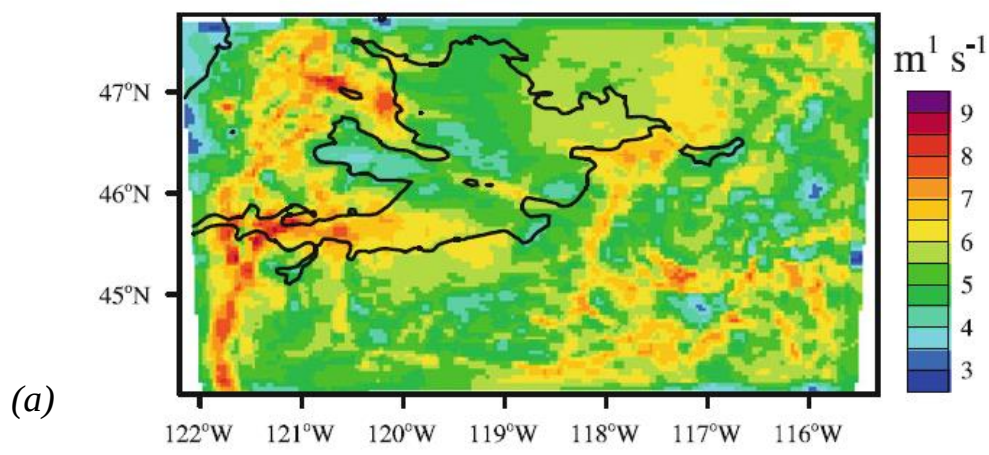
Các giá trị tốc độ gió trung bình ở 5 độ cao khác nhau được hiển thị và được khớp hàm lý thuyết như trong Hình 3.6. Hàm khớp lý thuyết này thể hiện mối quan hệ giữa phân bố tốc độ gió và độ cao đối với các bề mặt địa hình có độ nhám đặc trưng khác nhau. Hàm khớp lý thuyết thu được từ Hình 3.6 được thể hiện trong phương trình (3.5) với số mũ Hellmann là 0,12, được sử dụng để thiết lập giá trị tốc độ gió trung bình theo chiều cao tại mặt phẳng đầu vào của mô hình mô phỏng CFD:

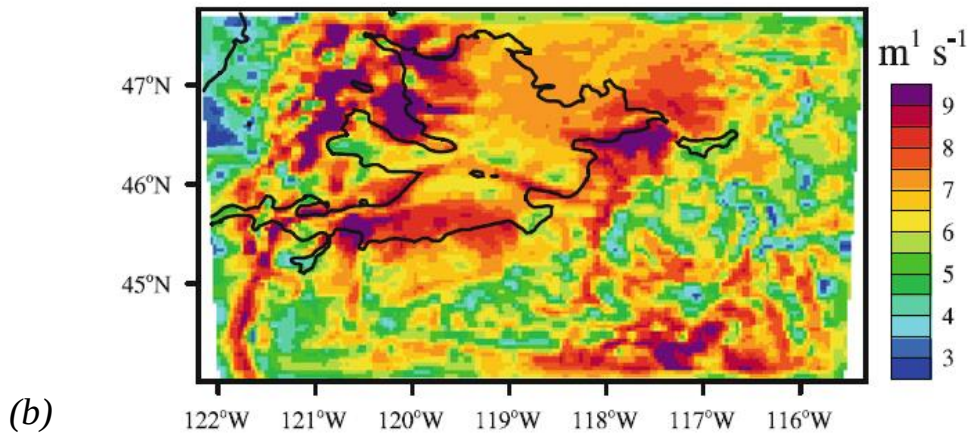
$$WindSpeed = 6.14 \times \left(\frac{h}{10} \right)^{0.12} \quad (3.5)$$



Hình 3.6. Phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao thu được từ dữ liệu của Ngân hàng Thế giới [62]

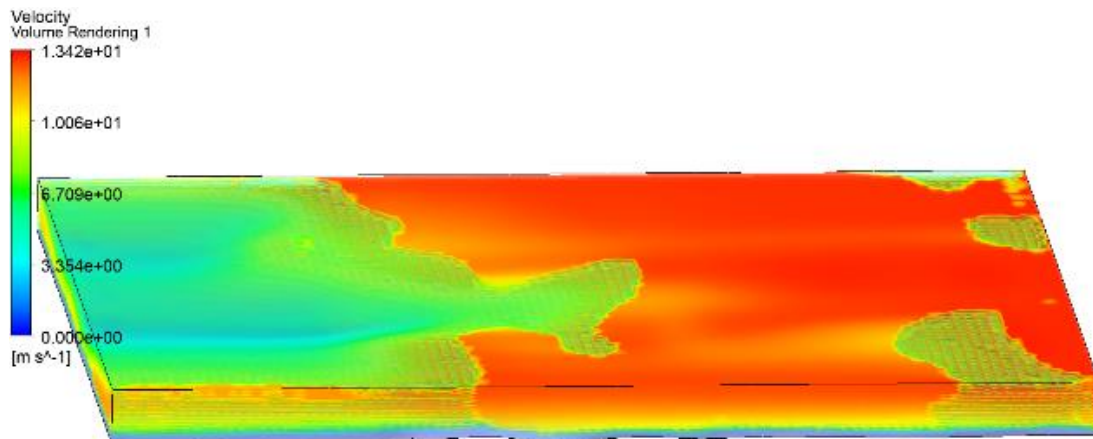
Từ phương trình (3.5), tốc độ gió trung bình ở độ cao 62 m được xác định là 7,64 m/s, rất gần với giá trị đo thực nghiệm là 7,7 m/s của Phòng thí nghiệm Pacific Northwest National Laboratory [63]. Trong trường hợp này, độ chênh lệch giữa các giá trị thu được từ mô hình mô phỏng CFD và thực nghiệm chỉ khoảng 0,8%. Điều này chứng tỏ dữ liệu đầu vào và mô hình mô phỏng CFD được xây dựng trong nghiên cứu này có độ tin cậy rất cao. Hơn nữa, theo tài liệu tham khảo [66], tốc độ gió ở độ cao 80 m trong vùng tọa độ (45,9551°N, -118,6877°W) có giá trị khoảng 7,5 m/s đến 8,0 m/s như thể hiện trong Hình 3.7. Giá trị này rất phù hợp với các giá trị thu được từ phương trình (3.5). Điều này càng khẳng định độ tin cậy của hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao được sử dụng trong mô hình nghiên cứu này.





Hình 3.7. Tốc độ gió trung bình ở độ cao 80 m: (a) Ban ngày, (b) Ban đêm [66]

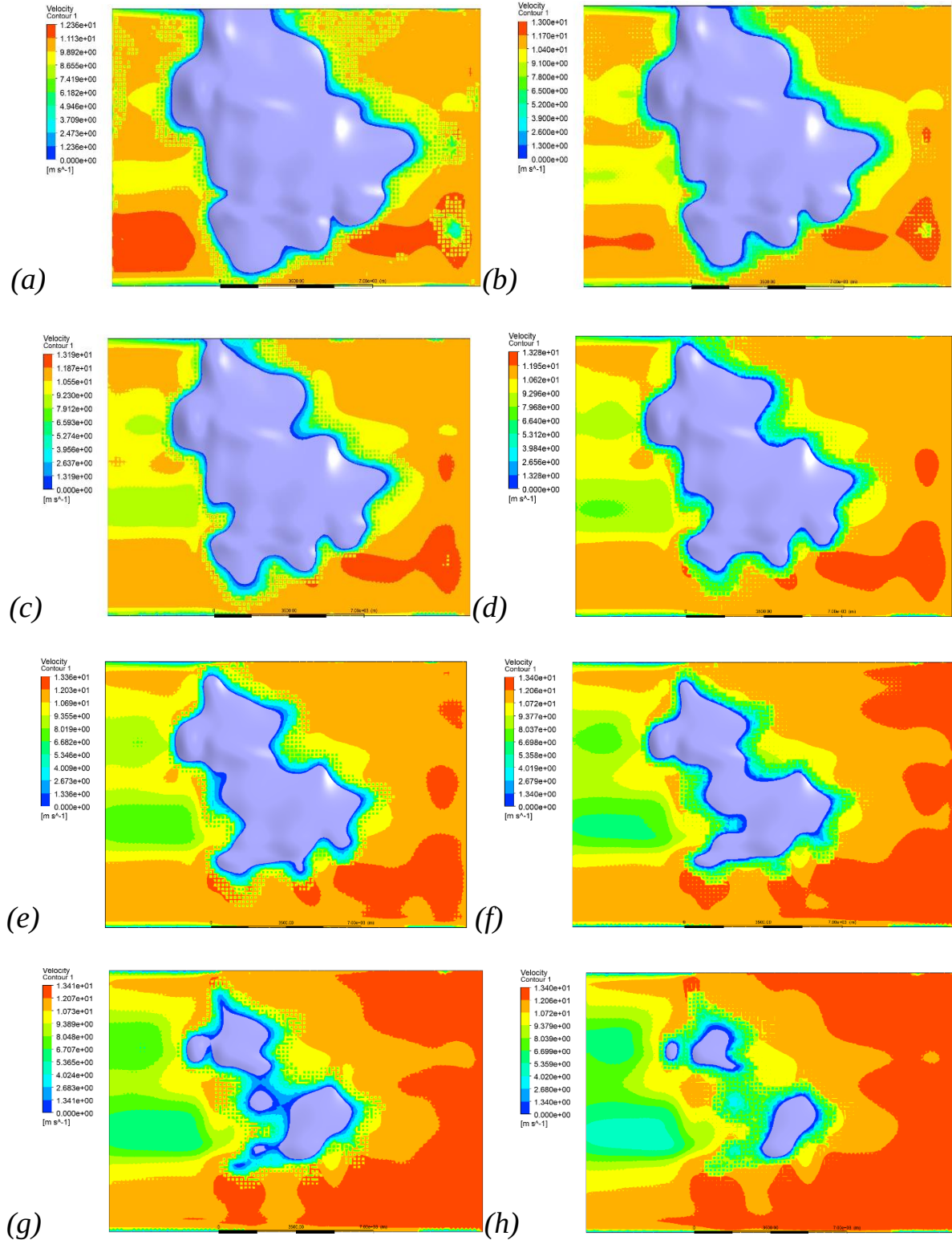
Sau khi xác nhận độ tin cậy của mô hình đã xây dựng được, mô hình Ninh Phước sẽ được chạy để phân tích ở trạng thái ổn định với tổng cộng 500 lần lặp. Sau khi quá trình giải mô hình hoàn tất, để có cái nhìn tổng quan về phân bố tốc độ gió trong toàn bộ mô hình, phân bố tốc độ gió trong không gian 3D được xử lý và hiển thị trong Hình 3.8.



Hình 3.8. Phân bố tốc độ gió trong không gian 3D khu vực Ninh Phước

Hình 3.8 cho thấy khu vực sườn núi phía trước, từ hướng Biển Đông, sẽ có tốc độ gió cao hơn các khu vực khác. Ngược lại, khu vực sườn núi phía sau, sườn phía Tây, lại có tốc độ gió rất thấp. Lý do của sự khác biệt này có thể được giải thích một cách khái quát là khi gió gặp sườn núi phía trước, không gian sẽ bị thu hẹp, dẫn đến tốc độ gió phải tăng lên để đảm bảo định luật bảo toàn khối lượng. Trong trường hợp gió thổi về phía sườn sau, luồng gió sẽ tạo thành các xoáy do ma sát với bề mặt địa hình gồ ghề, từ đó các hướng gió sẽ bị triệt tiêu, dẫn đến sự

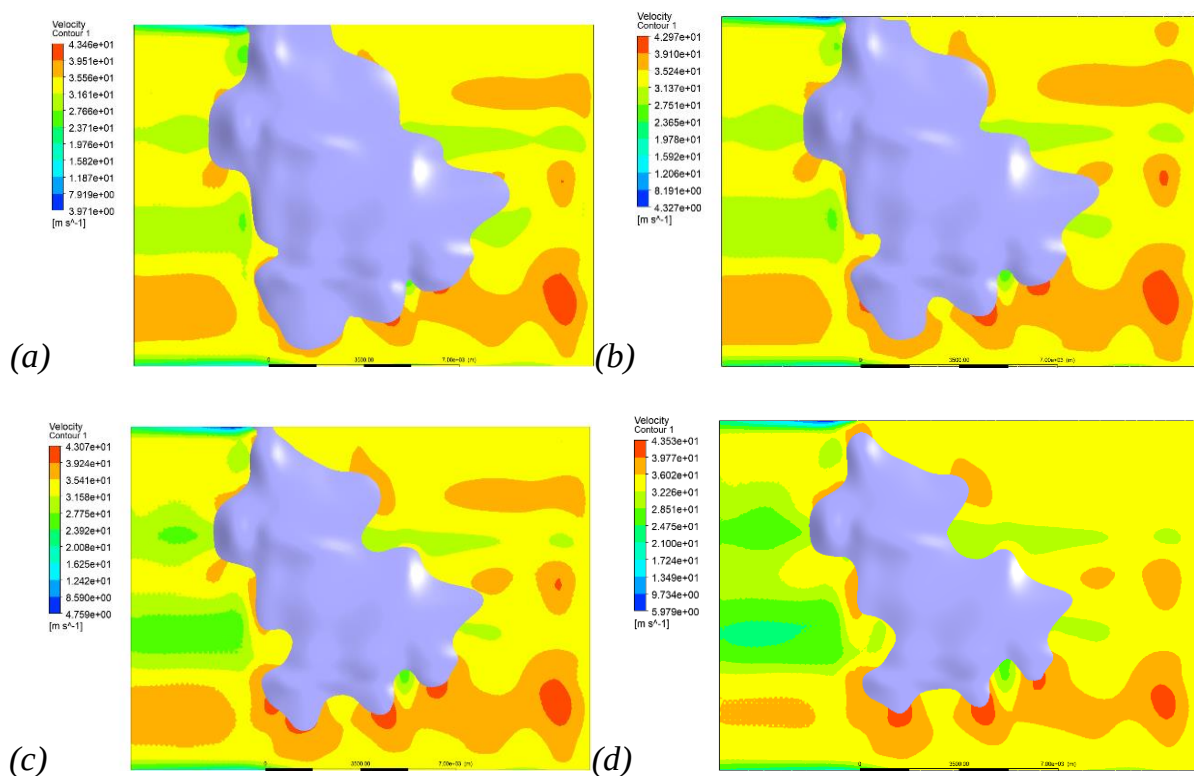
giảm đáng kể giá trị tốc độ gió. Sự phân bố tốc độ gió trong mặt cắt ngang ở các độ cao khác nhau được thể hiện chi tiết trong Hình 3.9.

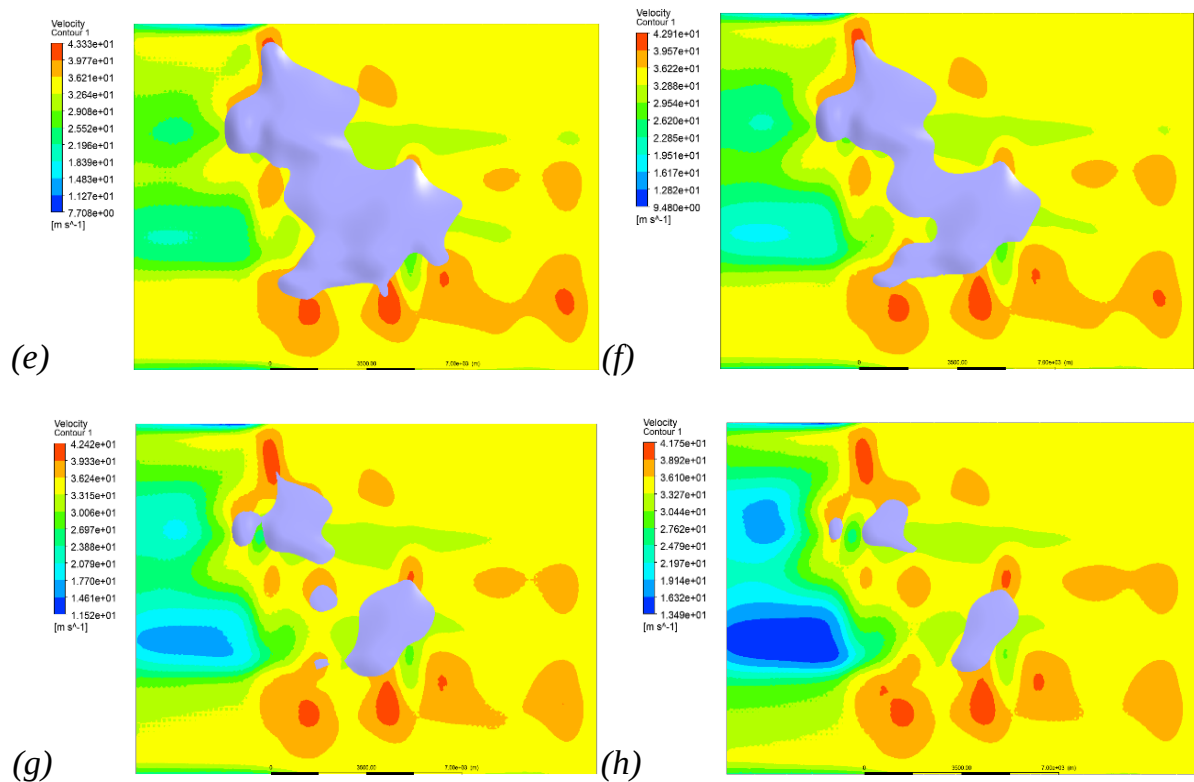


Hình 3.9. Phân bố tốc độ gió ở các độ cao khác nhau: (a) $h=166 \text{ m}$, (b) $h=216 \text{ m}$, (c) $h=266 \text{ m}$, (d) $h=316 \text{ m}$, (e) $h=366 \text{ m}$, (f) $h=416 \text{ m}$, (g) $h=466 \text{ m}$ và (h) $h=516 \text{ m}$

Các mặt cắt phân bố tốc độ gió chi tiết từ Hình 3.9 cho thấy rõ ràng rằng các khu vực từ phía Đông đến trung tâm của mô hình có địa hình bằng phẳng, với tốc độ gió lớn hơn 9,9 m/s. Hình 3.9 (a) cho thấy khu vực phía đông ở độ cao khoảng 160 m với tốc độ gió trung bình khoảng 9,0 m/s. Khu vực này giáp biển, có địa hình bằng phẳng và đường sá thuận tiện, rất thích hợp để xây dựng trang trại gió. Chiều dài của khu vực này khoảng 12.000 m và chiều rộng khoảng 6.000 m. Giả sử khu vực này được lắp đặt tuabin 4,0 MW. Các tuabin này được lắp đặt theo hàng ngang, mỗi tuabin cách nhau 1.000 m, do đó mỗi hàng dọc theo chiều rộng của mô hình có thể lắp đặt 12 cột. Mô hình có thể được lắp đặt tối đa 5 hàng. Tổng số tuabin gió có thể lắp đặt sẽ đạt 60, tương ứng với tổng công suất lắp đặt là 240,0 MW. Đây là một khu vực lý tưởng để xây dựng một trang trại điện gió.

Tuy nhiên, Việt Nam thường xuyên có những cơn bão lớn, có thể ảnh hưởng đến tính toàn vẹn của các tuabin trong suốt vòng đời hoạt động của chúng (khoảng 20 năm). Do đó, xem xét trường hợp gió bão rất mạnh cấp 12 theo thang gió Beaufort [67], tốc độ gió đạt từ 32,19 m/s đến 37,10 m/s. Chọn tốc độ gió tại điều kiện biên của mô hình là 35,0 m/s và cường độ chảy rối là 10% và chạy lại phân tích mô hình theo các bước trên. Kết quả thu được tương tự như trong Hình 3.10.





Hình 3.10. Phân bố tốc độ gió ở các độ cao khác nhau trong điều kiện gió bão: (a) $h=166\text{ m}$, (b) $h=216\text{ m}$, (c) $h=266\text{ m}$, (d) $h=316\text{ m}$, (e) $h=366\text{ m}$, (f) $h=416\text{ m}$, (g) $h=466\text{ m}$ và (h) $h=516\text{ m}$.

Từ Hình 3.10, khi xảy ra một cơn bão lớn, khu vực từ phần trung tâm đến phần phía Nam của mô hình xuất hiện tốc độ gió đạt hơn $40,0\text{ m/s}$. Điều này có thể gây ra các sự cố như gãy cánh quạt tuabin, gây thiệt hại nghiêm trọng về kinh tế và an toàn cho nhà máy. Sự khác biệt trong phân bố tốc độ gió ở hai phía chủ yếu là do địa hình khác nhau. Khu vực phía Tây Nam có nhiều đồi núi, khi gió thổi từ biển vào, nó sẽ va chạm với chướng ngại vật là các ngọn đồi, gây ra sự thay đổi hướng gió, gió sẽ thổi mạnh hơn, dẫn đến sự gia tăng bất thường về tốc độ gió. Những thay đổi này sẽ trở nên rõ ràng hơn khi tốc độ gió đầu vào tăng lên. Ngược lại, khu vực phía Đông Bắc của mô hình bằng phẳng hơn, do đó tốc độ gió ở khu vực này sẽ luôn ổn định hơn so với các khu vực còn lại. Để tránh những tác động tiêu cực do các cơn bão lớn gây ra, diện tích thích hợp để xây dựng tuabin được thu hẹp lại một nửa. Cuối cùng, khu vực thích hợp nhất là khu vực phía Đông Bắc của mô hình với diện tích khoảng 3.000 ha .

Rõ ràng, mô hình GIS-CFD được sử dụng để xác định các khu vực có tiềm năng năng lượng gió tốt nhất. Ngoài ra, mô hình này cũng chỉ ra các vị trí có nguy cơ cao khi xảy ra bão. Do ảnh hưởng của bề mặt địa hình, có thể tạo ra các khu vực có xoáy và tốc độ gió cao bất thường, có thể gây hư hại nghiêm trọng cho cánh quạt tuabin. Theo tiêu chuẩn IEC 61400-1 [68], các tuabin IA, IB, với tốc độ gió định mức 10,0 m/s, phải chịu được gió giật 70,0 m/s trong 3 s trong hơn 50 năm. Các tuabin IIA, IIB, với tốc độ gió định mức 8,5 m/s, phải chịu được gió giật 59,5 m/s. Các tuabin IIIA, IIIB, với tốc độ gió định mức 7,5 m/s, phải chịu được gió giật 52,5 m/s. Các tuabin loại S, với tốc độ gió định mức 6,0 m/s, phải chịu được gió giật 42,0 m/s. Để đảm bảo tuân thủ tiêu chuẩn IEC 61400-1, các nhà sản xuất tuabin cần lựa chọn công nghệ và vật liệu phù hợp. Tuy nhiên, thông tin chi tiết về các nội dung này thường không có sẵn.

Trong luận án này, mục tiêu nghiên cứu là xây dựng mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin để đạt được hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt nhất khi hoạt động ở tốc độ gió phổ biến tại Việt Nam (4,5-6,5 m/s). Thông qua các kết quả ban đầu thu được, cánh tuabin VAST-EPU cho hiệu suất cao nhất với chiều dài cánh khoảng dưới 10,0 m. Với kích thước này, cánh VAST-EPU có thể được sản xuất bằng công nghệ in 3D với vật liệu composite. Các loại vật liệu này nhẹ và rất bền. Do đó, cánh tuabin VAST-EPU hoàn toàn đảm bảo tính toàn vẹn cấu trúc và khả năng chịu tải trong mọi điều kiện thời tiết khắc nghiệt. Nội dung nghiên cứu chi tiết về các đặc điểm này sẽ được tiếp tục trong thời gian tới.

Tóm lại:

Mô hình mô phỏng GIS – CFD được đề xuất trong nghiên cứu này có thể giúp lựa chọn các khu vực và vị trí phù hợp nhất để phát triển các dự án điện gió trên bờ tại Việt Nam. Kết quả thu được từ mô hình này bao gồm vị trí và đặc điểm địa hình của các trang trại, phân bố tốc độ gió theo địa hình và độ cao, đây sẽ là cơ sở quan trọng để tiến hành các nghiên cứu sâu hơn về thiết kế biên dạng cánh quạt và cấu hình lắp đặt tuabin trong khu vực trang trại gió trên đất liền.

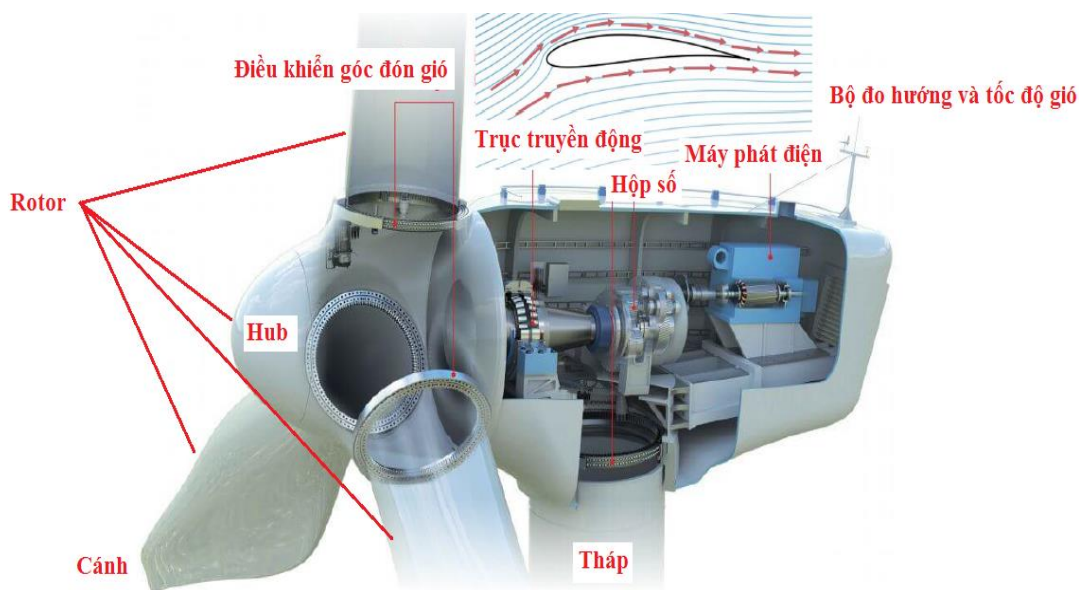
III.2. Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin

Mô hình GIS – CFD cho phép xác định đặc điểm địa hình và tài nguyên gió tại mỗi vị trí trong khu vực phát triển trang trại gió. Hàm phân bố tốc độ gió và cường độ chảy rối theo độ cao là cơ sở quan trọng để lựa chọn hoặc thiết kế tuabin gió phù hợp như đã được phân tích trong phần trên.

Việt Nam có tiềm năng lớn về năng lượng gió, tổng tiềm năng năng lượng gió trên bờ khoảng 221.000 MW, tổng tiềm năng năng lượng gió ngoài khơi khoảng 600.000 MW. Tốc độ gió ở độ cao 80 m có giá trị trong khoảng 3,0 – 8,0 m/s. Tuy nhiên, tốc độ gió chủ yếu từ 4,5 – 6,5 m/s, rất ít khu vực có tốc độ gió lớn hơn 6,5 m/s [4]. Đến năm 2025, các khu vực trên bờ có tốc độ gió trung bình cao hơn 8,0 m/s đã được sử dụng hoặc đưa vào quy hoạch. Những khu vực này chỉ có thể tạo ra một phần rất nhỏ công suất. Hiện nay, cần phải tính đến việc khai thác các khu vực có tốc độ gió thấp hơn. Điều này đòi hỏi các nghiên cứu về thiết kế biên dạng cánh quạt tuabin gió để đạt được hệ số công suất cao nhất khi hoạt động trong các khu vực có tốc độ gió thấp. Từ mô hình GIS - CFD, dự báo sự thay đổi tốc độ gió theo địa hình và độ cao như đề xuất trong Phần III.1, các giá trị tốc độ gió trung bình theo địa hình và độ cao tại mỗi vị trí dự kiến sẽ được xác định chính xác. Đây là cơ sở thực tiễn để thiết kế biên dạng cánh quạt nhằm đạt được các giá trị hệ số công suất cao nhất.

Cơ sở lý thuyết chung để tính toán các thông số của tuabin gió là lý thuyết BEM. Nguyên lý hoạt động của tuabin trục ngang ba cánh có thể được tóm tắt như sau: Gió tác động vào các cánh tuabin, truyền động năng để làm quay các cánh tuabin; Các cánh tuabin được nối với một HUB và trục quay để tạo thành rôto. Rôto được liên kết với một hệ thống trục truyền động, hộp số và máy phát điện. Khi rôto quay, nó sẽ tạo ra năng lượng cơ học để làm quay các trục truyền động, sau đó năng lượng này làm quay máy phát điện, và cuối cùng được chuyển đổi thành năng lượng điện; Năng lượng điện này được dẫn bằng dây cáp xuống một máy biến áp nhỏ đặt ở chân móng tháp, sau đó được truyền đến trạm biến áp

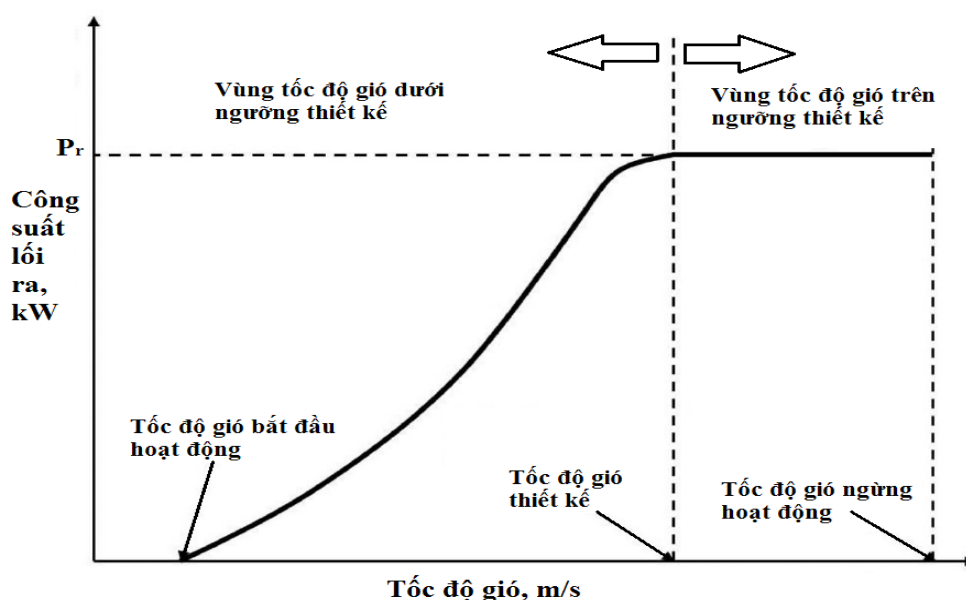
trung tâm của trang trại gió. Hình 3.11 minh họa các thành phần chính của tuabin trục ngang ba cánh.



Hình 3.11. Minh họa các thành phần chính của tuabin trục ngang

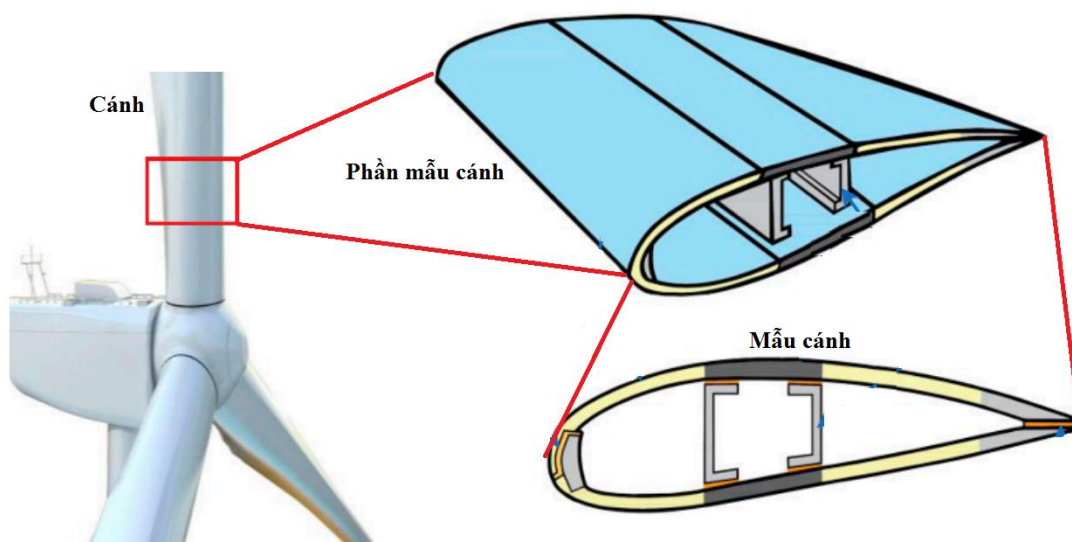
Theo lý thuyết BEM, công suất điện đầu ra của tuabin gió sẽ phụ thuộc vào các yếu tố như mật độ không khí, tốc độ gió, chiều dài cánh quạt, hệ số công suất, hiệu suất hệ thống cơ khí và hiệu suất máy phát điện như được trình bày chi tiết trong Phần II.2. Mỗi thiết kế tuabin sẽ được liên kết với một đường cong đặc tính Công suất - Tốc độ gió để biểu thị giá trị công suất điện đầu ra thu được khi tuabin hoạt động ở tốc độ gió thực tế. Đường cong đặc tính này được minh họa trong Hình 3.12.

Trên thực tế, có nhiều thiết kế tuabin có công suất định mức (P_r) lớn, nhưng công suất điện đầu ra thực tế lại nhỏ. Bởi vì, chúng phải hoạt động ở tốc độ gió dưới ngưỡng thiết kế. Điều này gây ra tổn thất lớn không chỉ về kinh tế mà còn cả các vấn đề kỹ thuật liên quan đến tính chất cơ khí của các bộ phận và thiết bị trong tuabin. Khu vực địa hình ở Việt Nam có tốc độ gió dưới 8 m/s, thấp hơn hầu hết các giá trị tốc độ gió định mức của các tuabin hiện đang phổ biến trên thị trường. Để tuabin gió đạt được hiệu suất hoạt động cao nhất, cần phải nghiên cứu, đánh giá và cải tiến thiết kế các bộ phận. Trong đó, việc cải tiến thiết kế biên dạng cánh tuabin theo tốc độ gió thực tế là vấn đề đầu tiên và quan trọng nhất.



Hình 3.12. Minh họa đường cong đặc tính Công suất - Tốc độ gió

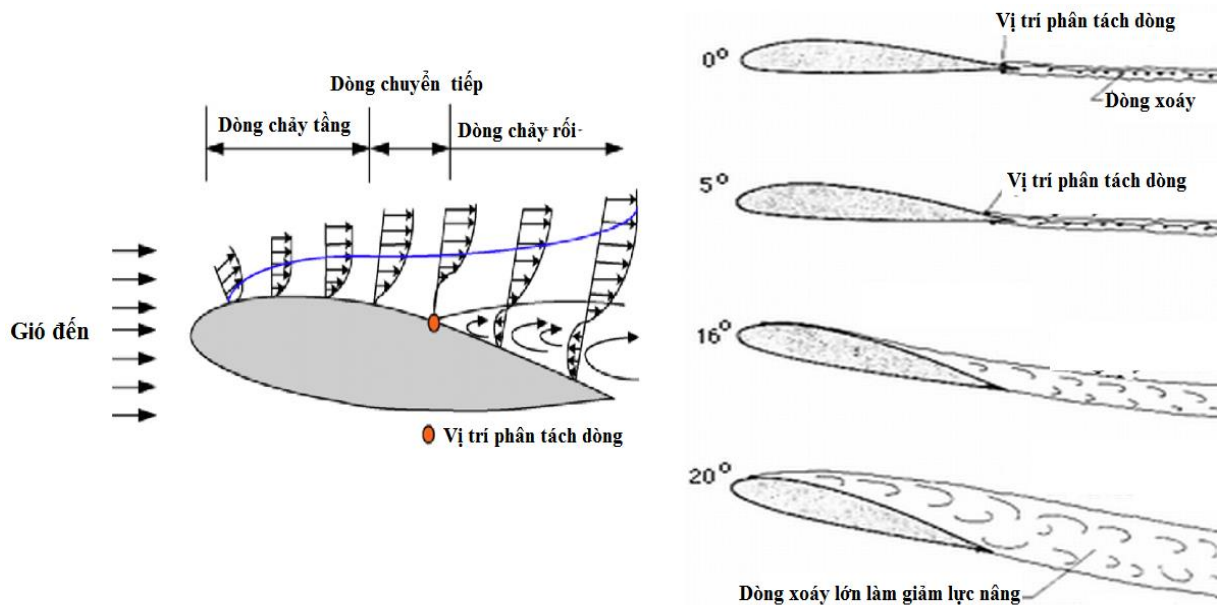
Cánh tuabin gió thường được thiết kế từ nhiều phần mẫu cánh biên dạng khí động học khác nhau. Các mẫu cánh này sẽ được đặt ở các vị trí, độ dày, chiều dài và góc xoắn khác nhau để tạo ra một thiết kế cánh hoàn chỉnh. Hình 3.13 minh họa thiết kế của một cánh tuabin gió trục ngang.



Hình 3.13. Minh họa thiết kế của một cánh tuabin gió trục ngang

Khi gió thổi vào tương tác với bề mặt của các phần mẫu cánh khác nhau, tùy thuộc vào tốc độ gió, góc tấn công, kích thước và độ nhám bề mặt của phần mẫu cánh, các hiện tượng khác nhau sẽ xảy ra như minh họa trong Hình 3.14. Nếu các mô hình biên dạng mẫu cánh được thiết kế về kích thước và giá trị góc xoắn

phù hợp với tốc độ gió thổi đến, nó sẽ tạo ra lực nâng lớn nhất và lực cản nhỏ nhất, khi đó tỷ lệ C_l/C_d sẽ đạt giá trị lớn nhất. Ngược lại, nếu kích thước biên dạng phần mẫu cánh hoặc giá trị góc xoắn không phù hợp với đặc điểm của gió thổi đến, nó sẽ tạo ra lực cản lớn hơn và làm giảm lực nâng, dẫn đến giá trị C_l/C_d thấp.



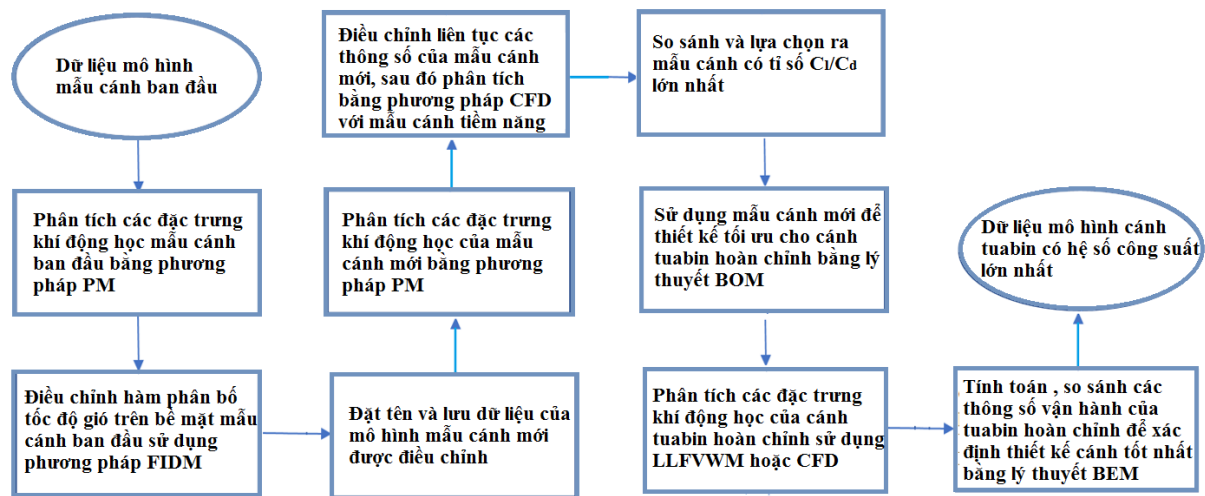
Hình 3.14. Minh họa quá trình tương tác giữa dòng chảy tới và phần mẫu cánh tuabin

Khi gió thổi đến tương tác với cánh tuabin dưới cùng một giá trị góc tấn công, mỗi phần mẫu cánh sẽ đón gió ở một góc khác nhau. Hệ số công suất của toàn bộ cánh sẽ phụ thuộc vào tỉ lệ lực nâng trên lực cản của mỗi phần mẫu cánh. Do đó, để thiết kế một cánh hoàn chỉnh, cần phải nghiên cứu thiết kế các mô hình mẫu cánh. Sau đó, các phần mẫu cánh được chọn sẽ được kết hợp với các góc xoắn khác nhau để tạo ra một biên dạng cánh tối ưu dựa trên lý thuyết BOM. Mô hình chi tiết để thiết kế biên dạng cánh tuabin đề xuất được thể hiện trong Hình 3.15. Mô hình thiết kế tối ưu biên dạng cánh tuabin bao gồm 11 bước như sau:

- Bước 1: Chọn một mô hình mẫu cánh có hiệu suất khai thác năng lượng gió cao - Mô hình mẫu cánh ban đầu.

- Bước 2: Phân tích các thông số khí động học của mô hình mẫu cánh ban đầu trong vùng tốc độ gió quan tâm bằng cách sử dụng phương pháp PM. Kết quả là hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hoạt

động ở tốc độ gió và đồ thị hoặc hàm phân bố tốc độ gió hoặc áp suất gió trên bề mặt của mô hình mẫu cánh ban đầu.



Hình 3.15. Sơ đồ mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin

- Bước 3: Điều chỉnh đồ thị hoặc hàm phân bố tốc độ gió hoặc hàm phân bố áp suất gió trên bề mặt của mô hình mẫu cánh ban đầu để thu được đồ thị hoặc hàm phân bố áp suất mới với sự khác biệt lớn nhất giữa bề mặt trên và bề mặt dưới của mô hình cánh ban đầu. Kết quả là thu được một hàm phân bố tốc độ gió mới hoặc hàm phân bố áp suất gió mới. Sau đó, một biên dạng mẫu cánh mới tương ứng sẽ được tạo ra bằng cách sử dụng phương pháp FIDM.

- Bước 4: Lưu dữ liệu của biên dạng mẫu cánh mới với tên hoặc số nhận dạng phù hợp.

- Bước 5: Phân tích các thông số khí động học của mô hình mẫu cánh mới ở cùng tốc độ gió bằng cách sử dụng phương pháp PM. Kết quả thu được là hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản. So sánh và đánh giá các giá trị thu được từ mô hình biên dạng mẫu cánh mới với mô hình ban đầu.

- Bước 6: Liên tục điều chỉnh các thông số thiết kế của mô hình biên dạng mẫu cánh mới như MT, MTP, MC và MCP để thu được các biên dạng mẫu cánh mới khác nhau. Sau đó, tất cả các mô hình biên dạng cánh mới được phân tích khí động học bằng phương pháp PM hoặc CFD. Kết quả thu được là hệ số lực nâng,

hệ số lực cản, tỉ số hệ số nâng trên hệ số cản của các mô hình mẫu cánh mới ở cùng tốc độ gió.

- Bước 7: So sánh và đánh giá tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản của mô hình mẫu cánh ban đầu và các mô hình biên dạng mẫu cánh mới. Sau đó, chọn mô hình biên dạng mẫu cánh có tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản lớn nhất. Kết quả là thu được thiết kế biên dạng mẫu cánh tối ưu trong vùng tốc độ gió quan tâm.

- Bước 8: Sử dụng lý thuyết BOM để sắp xếp các mô hình biên dạng mẫu cánh theo các thông số kích thước và góc xoắn khác nhau để tạo ra các thiết kế cánh hoàn chỉnh. Mỗi thiết kế cánh hoàn chỉnh có thể sử dụng nhiều loại biên dạng mẫu cánh khác nhau, nhưng cũng có thể chỉ sử dụng mô hình biên dạng mẫu cánh có hệ số C_l/C_d lớn nhất. Kết quả là thu được các thiết kế biên dạng cánh tuabin hoàn chỉnh cho hệ số C_L/C_D lớn nhất.

- Bước 9: Các biên dạng cánh tuabin mới này được phân tích khí động học bằng phương pháp LLFVWM hoặc CFD để tính toán giá trị C_p ở các tốc độ gió khác nhau trong toàn bộ giải làm việc. Thiết kế biên dạng cánh tuabin có giá trị C_p lớn nhất được lựa chọn.

- Bước 10: Sử dụng biên dạng cánh có hệ số công suất lớn nhất để tạo ra tuabin trục ngang 3 cánh theo các thông số thiết kế khác nhau. Sau đó, lý thuyết BEM được sử dụng để xác định các thông số vận hành của tuabin, chẳng hạn như công suất điện đầu ra, dựa trên các thông số vận hành của hệ thống cơ khí và máy phát điện. Kết quả thu được là các giá trị vận hành của các thiết kế tuabin trong các điều kiện khác nhau.

- Bước 11: So sánh các giá trị hệ số công suất của các thiết kế tuabin và chọn thiết kế tuabin có giá trị C_p lớn nhất. Kết quả thu được là một thiết kế cánh tuabin tối ưu trong vùng tốc độ gió quan tâm. Cuối cùng, dữ liệu chi tiết của thiết kế cánh tuabin tối ưu được xuất ra và đặt tên phù hợp.

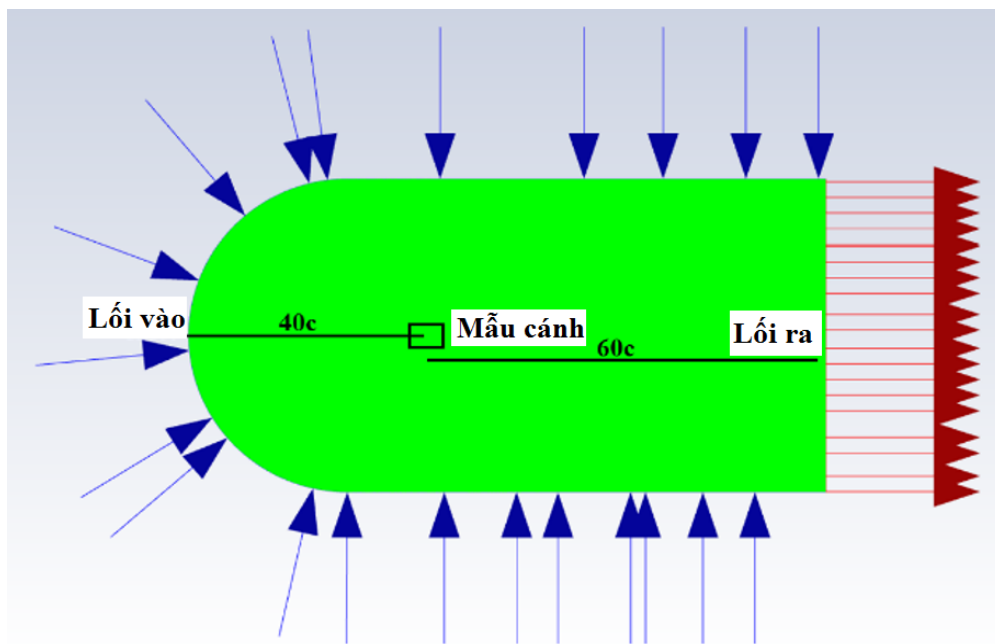
Mô hình thiết kế tối ưu của biên dạng cánh tuabin như thể hiện trong Hình 3.15 sau đó được triển khai áp dụng trong luận án này. Theo bước đầu tiên trong mô hình thiết kế tối ưu, một số mô hình biên dạng mẫu cánh ban đầu có hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt và thường được sử dụng trong lĩnh vực điện gió được lựa chọn, chẳng hạn như: NACA6409, S1010, S1223. Các thiết kế biên dạng mẫu cánh này đại diện cho các mô hình biên dạng cánh đối xứng và không đối xứng.

Từ bước 2 đến bước 7, các mô hình biên dạng mẫu cánh này được phân tích bằng phương pháp PM hoặc CFD để xác định các đại lượng khí động học đặc trưng trong điều kiện hoạt động với tốc độ gió trong khoảng 3,0 - 10,0 m/s. Kích thước của các mô hình biên dạng mẫu cánh sẽ được đưa về chiều dài tiêu chuẩn $c=1,0$ m và được chia đều thành 149 tấm khi sử dụng phương pháp PM. Tuy nhiên, vì vùng tốc độ gió phổ biến ở Việt Nam nằm trong khoảng 4,5 - 6,5 m/s, nên kết quả phân tích với vùng tốc độ gió này sẽ được trình bày cụ thể trong luận án. Tất cả 03 mô hình biên dạng mẫu cánh ban đầu đều được phân tích theo cùng các bước và sau khi so sánh và lựa chọn. Ba mô hình biên dạng mẫu cánh mới đã được ghi nhận với tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản tối đa tương ứng. Các mô hình mẫu cánh được tối ưu mới được đặt tên dựa trên sự hợp tác nghiên cứu giữa trường Đại học Điện lực và Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam: VAST-EPU-N6409, VAST-EPU-S1010, VAST-EPU-S1223.

Đánh giá độ tin cậy của các phương pháp PM và CFD:

Độ chính xác trong mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin phụ thuộc lớn vào các phương pháp phân tích khí động lực học được sử dụng. Các phương pháp PM và CFD đã được sử dụng để xác định các đại lượng khí động học của tất cả các mô hình thiết kế mẫu cánh và cánh tuabin hoàn chỉnh. Phương pháp PM cung cấp thời gian phân tích nhanh hơn so với phương pháp CFD. Do đó, phương pháp PM được sử dụng để đánh giá ban đầu các mô hình biên dạng cánh. Sau đó, các mô hình biên dạng cánh có hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt nhất sẽ được phân tích bằng phương pháp CFD để thu được kết quả chính xác hơn.

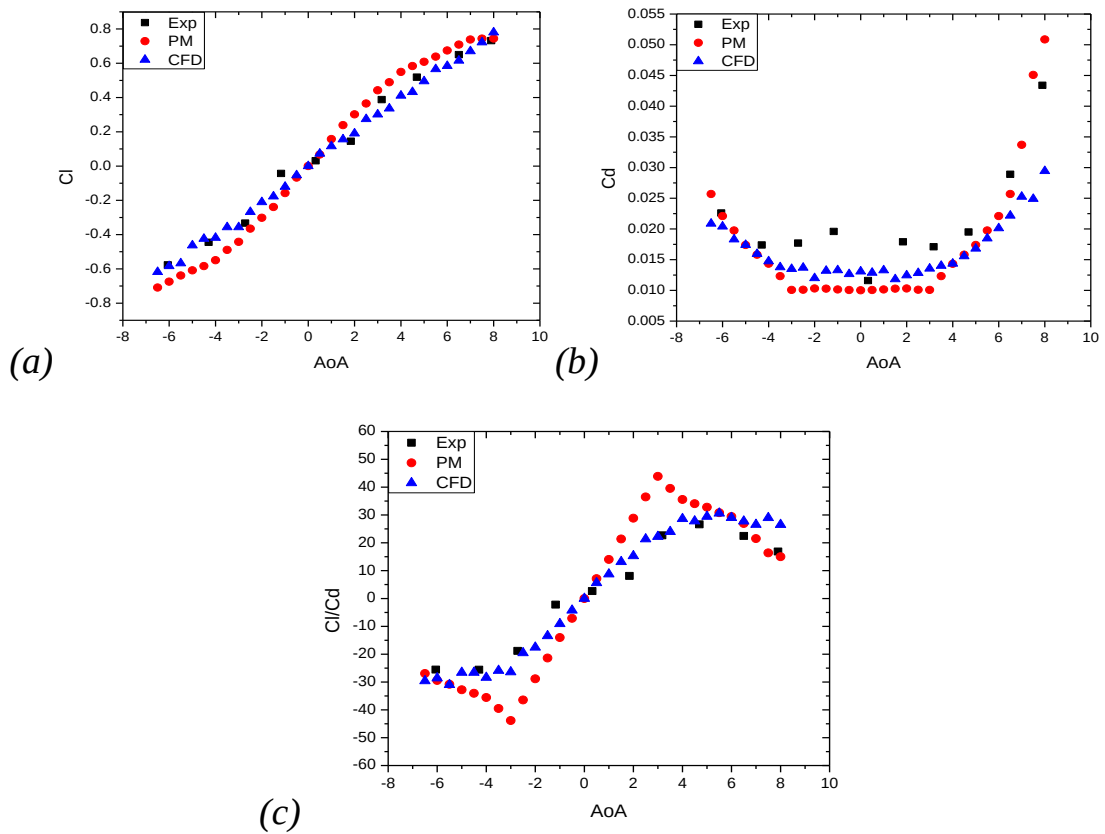
Để đánh giá độ tin cậy của phương pháp PM và CFD, các phân tích đã được thực hiện với các mô hình NACA64A010 hoạt động ở tốc độ gió lần lượt là 2,96 m/s, 4,87 m/s và 9,73 m/s. Sau đó, các kết quả thu được từ các mô hình mô phỏng sẽ được so sánh với các kết quả thực nghiệm từ nghiên cứu của Selig et al. [69]. Trong các mô hình phân tích bằng phương pháp PM, biên dạng mẫu cánh được chia thành 149 tấm. Các thông số khí động học sẽ được xác định dựa trên các hàm phân tích như được trình bày trong phần II.3.1. Trong mô hình CFD, mẫu cánh được đặt ở trung tâm, mặt trước là hình bán nguyệt có bán kính $40c$, không gian phía sau là hình chữ nhật có cạnh dài $60c$. Không gian xung quanh mẫu cánh được thể hiện trong Hình 3.16. Chiều dài dây cung của mẫu cánh là $0,3048$ m. Khoảng cách từ mép trước và hai mép bên đến tâm của mẫu cánh là $12,0$ m. Khoảng cách từ biên đầu ra đến tâm của mẫu cánh là $18,0$ m. Loại lưới là sự kết hợp giữa lưới tứ giác và lưới lục giác. Kích thước lưới là $0,03$ m. Lớp biên đầu tiên là $0,005$ m, tỉ lệ giữa các lớp là $1,2$ và tổng số lớp là 11 . Bộ giải được chọn là RANS, mô hình chảy rối là $k - \varepsilon$, số lần lặp giải số là 1.000 cho mỗi trường hợp phân tích.



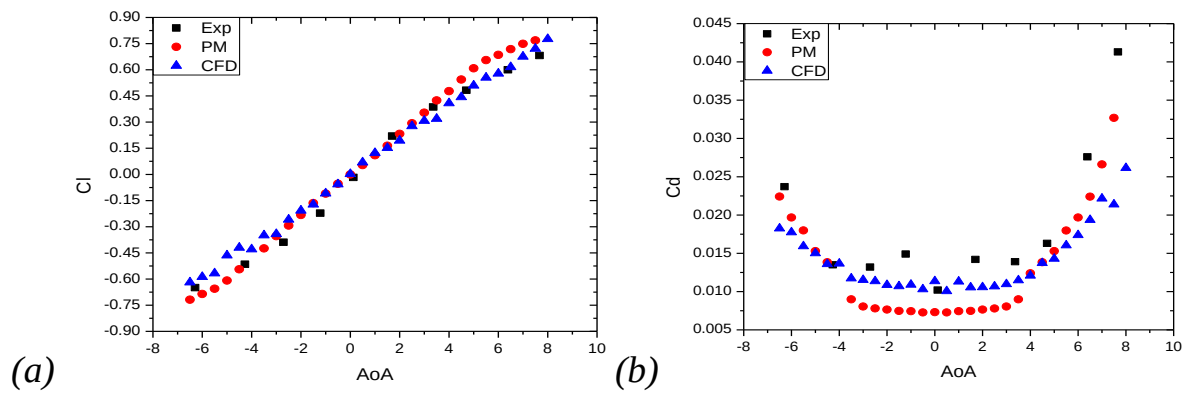
Hình 3.16. Mô hình mô phỏng CFD cho mẫu cánh

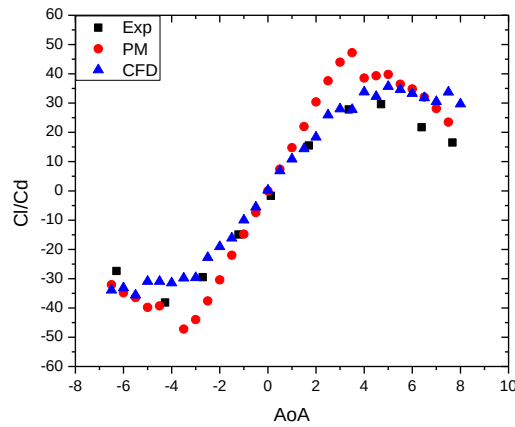
Kết quả thu được từ các mô hình PM và CFD được thể hiện trong Hình 3.17, Hình 3.18 và Hình 3.19. Sai số của phương pháp PM khoảng 10%, trong khi sai số của phương pháp CFD chỉ khoảng 3%. Kết quả này đã khẳng định rằng phương

pháp PM kém tin cậy hơn phương pháp CFD. Sai số của phương pháp PM càng lớn hơn khi tốc độ gió tăng lên trong khoảng từ 3,0 m/s đến 10,0 m/s.



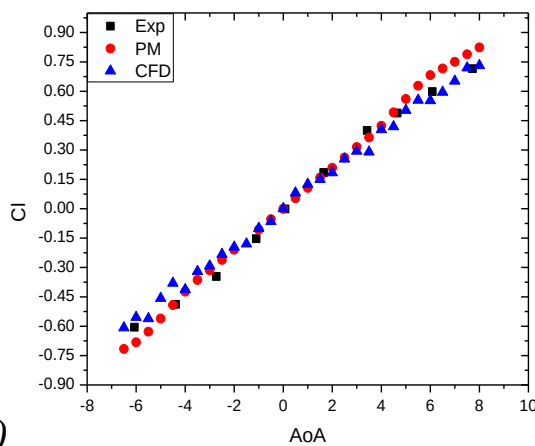
Hình 3.17. So sánh các thông số khí động học của NACA64A010 khi tốc độ gió là 2,96 m/s: C_l (a); C_d (b); C_l/C_d (c)



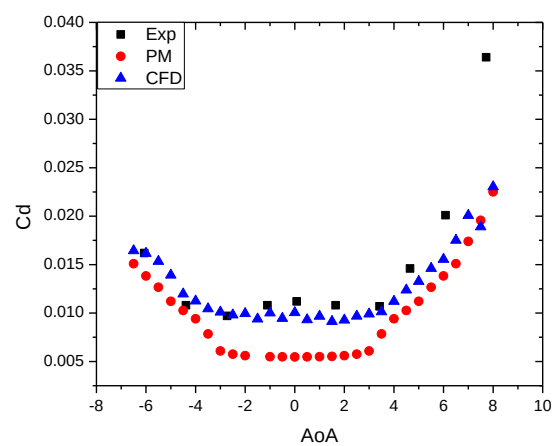


(c)

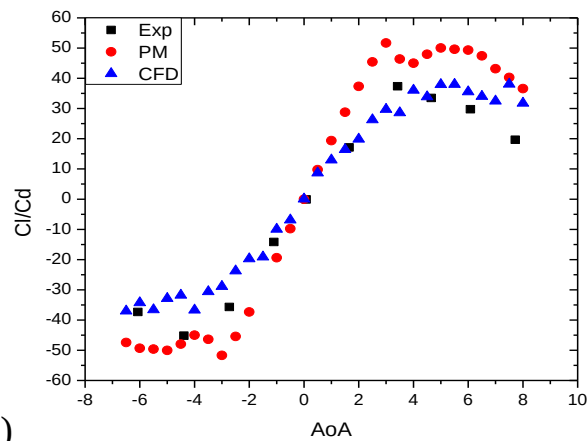
Hình 3.18. So sánh các thông số khí động học của NACA64A010 khi tốc độ gió là 4,78 m/s: C_l (a); C_d (b); C_l/C_d (c)



(a)



(b)



(c)

Hình 3.19. So sánh các thông số khí động học của NACA64A010 khi tốc độ gió là 9,73 m/s: C_l (a); C_d (b); C_l/C_d (c)

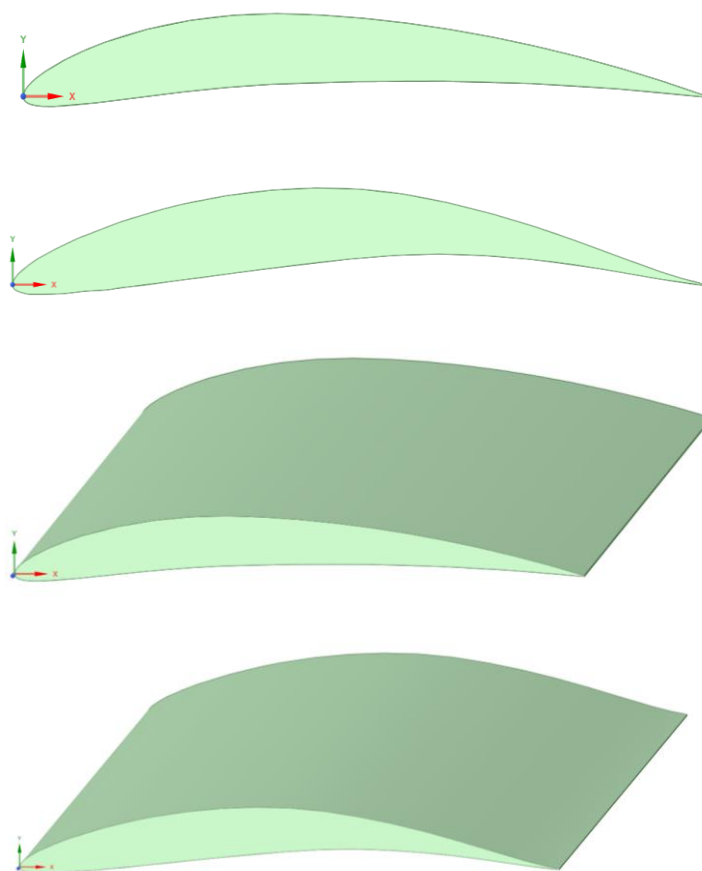
Phương pháp PM tuy rằng có độ chính xác không cao bằng Phương pháp CFD, nhưng có lợi thế về thời gian chạy mô hình phân tích. Do đó, Phương pháp PM nên được sử dụng để đánh giá sơ bộ các thiết kế mẫu cánh. Sau đó, phương pháp CFD sẽ phân tích lại đối với các thiết kế mẫu cánh có tiềm năng nhất.

III.2.1. Mô hình mẫu cánh NACA6409

Các thông số cơ bản của mô hình biên dạng mẫu cánh ban đầu và mô hình biên dạng mẫu cánh mới được tối ưu hóa thu được từ việc áp dụng mô hình thiết kế đề xuất được thể hiện trong Bảng 3.2 và Hình 3.20.

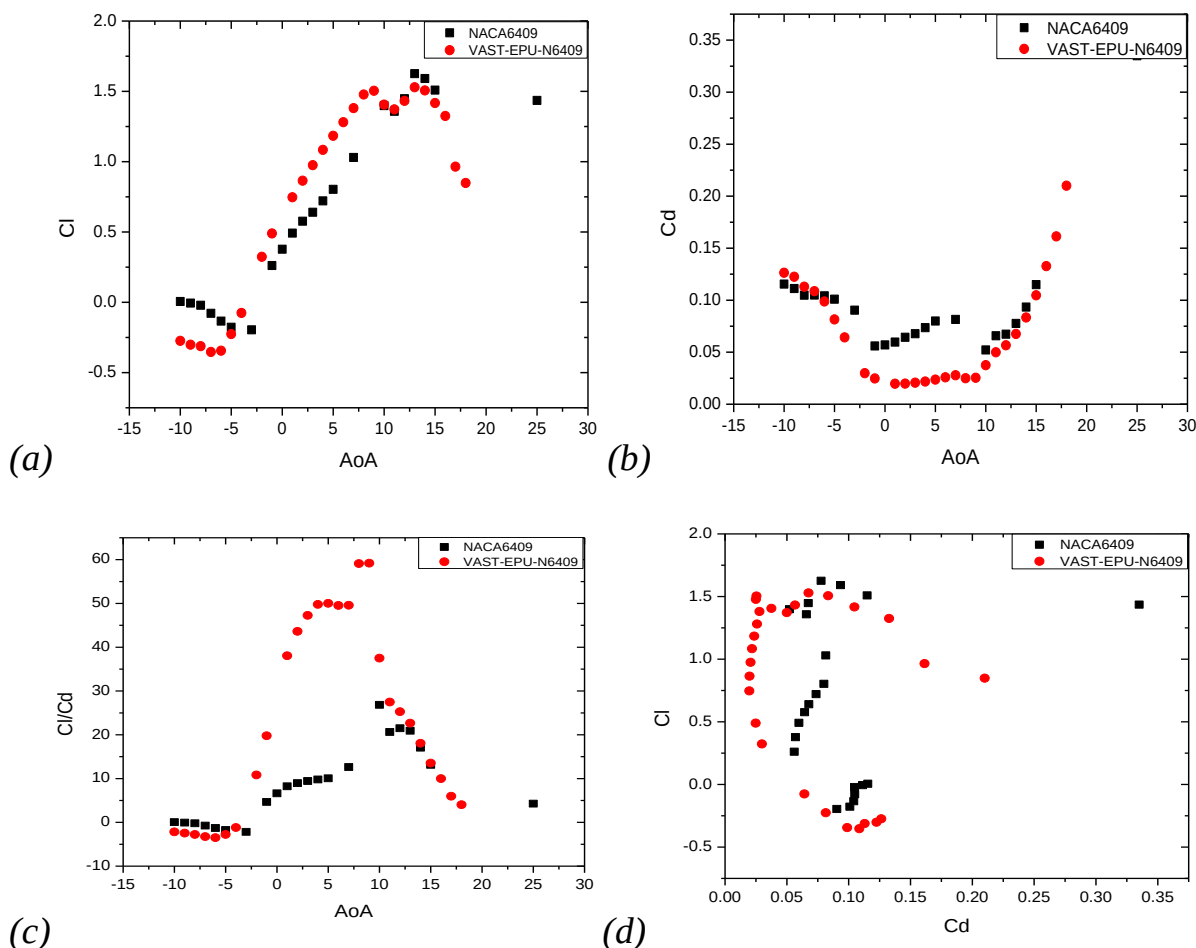
Bảng 3.2. Các thông số cơ bản của mô hình mẫu cánh NACA6409 và mẫu cánh VAST-EPU-N6409

Thông số	NACA6409	VAST-EPU-N6409
MT	9.00%	10.30%
MTP	30.03%	32.03%
MC	6.0%	7.99%
MCP	40.44%	51.45%



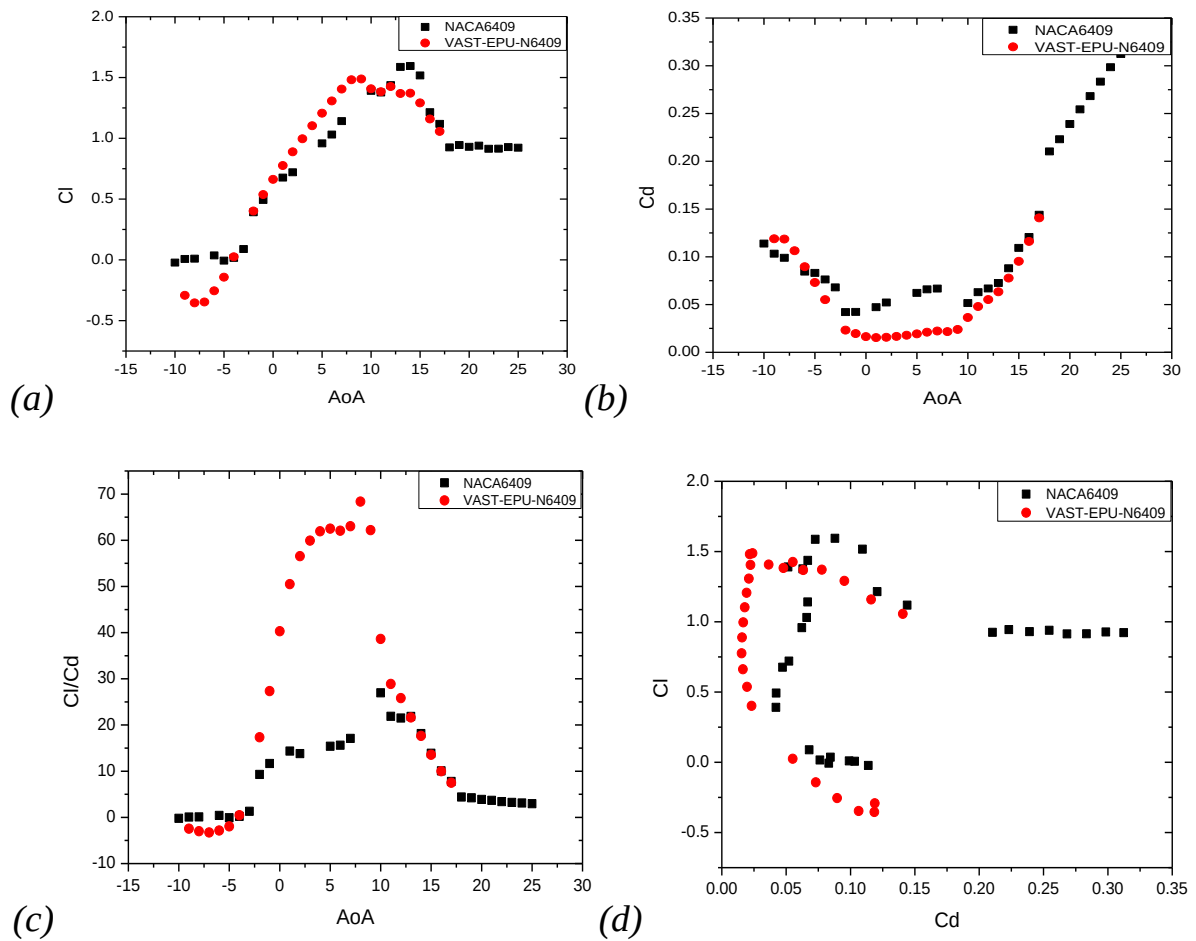
Hình 3.20. Hình dạng của mô hình biên dạng mẫu cánh NACA6409 và mẫu cánh VAST-EPU-N6409

Sau khi phân tích khí động học bằng phương pháp PM, các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản và tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình biên dạng mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s được thể hiện trong Hình 3.21.



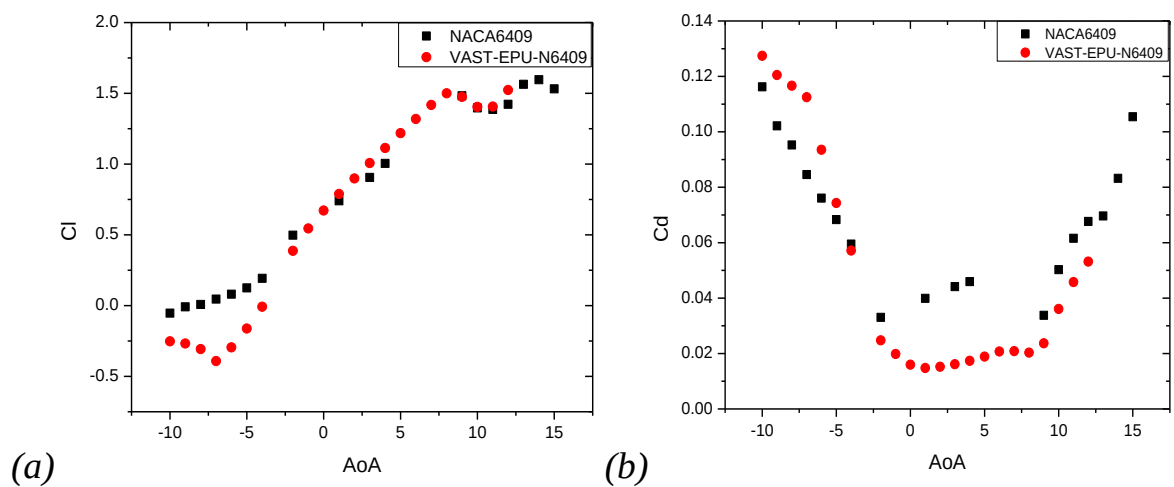
Hình 3.21. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của NACA6409 và VAST-EPU-N6409 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s

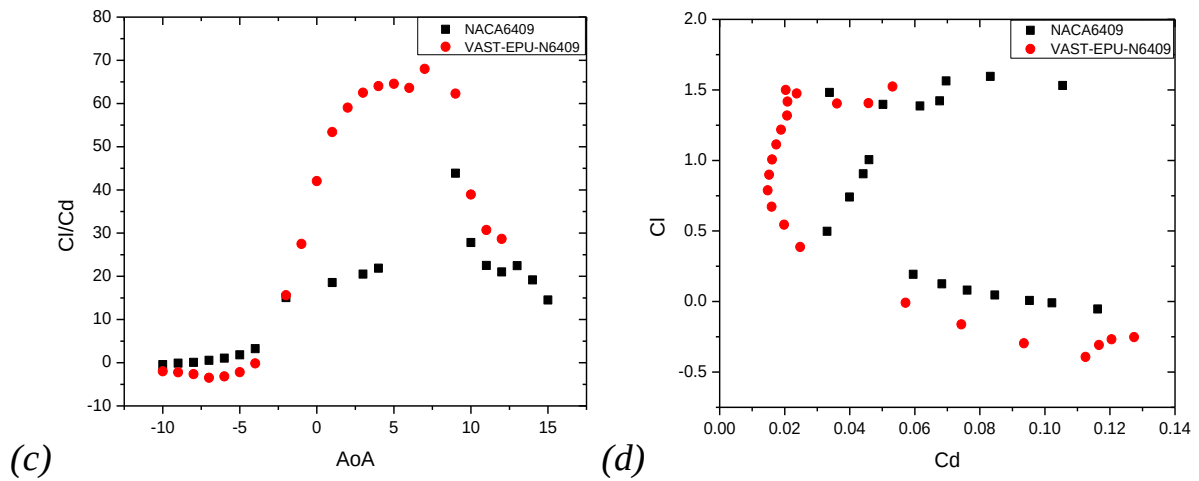
Tương tự, các đồ thị thể hiện các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s được thể hiện trong Hình 3.22.



Hình 3.22. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của NACA6409 và VAST-EPU-N6409 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s

Cuối cùng, các đồ thị thể hiện các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s được thể hiện trong Hình 3.23.





Hình 3.23. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của NACA6409 và VAST-EPU-N6409 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s

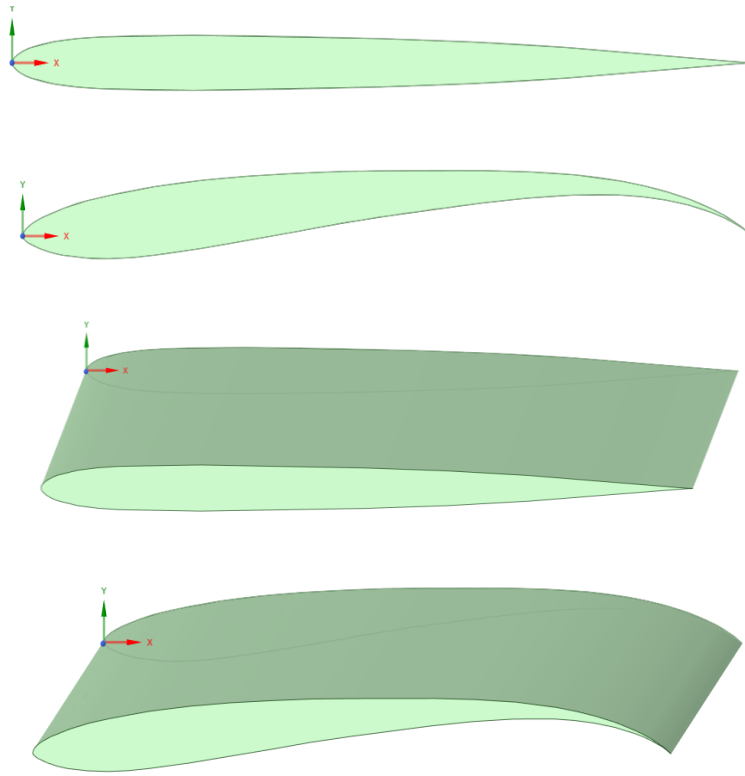
Kết quả cho thấy mô hình mẫu cánh VAST-EPU-N6409 có độ dày nhỏ hơn và độ cong lớn hơn so với mô hình mẫu cánh NACA6409 ban đầu. Khi hoạt động ở tốc độ gió từ 4,0 m/s đến 6,0 m/s, giá trị C_l/C_d tối đa của mô hình VAST-EPU-N6409 cao hơn lần lượt 4,5, 3,0, 1,2 lần so với mô hình mẫu cánh ban đầu. Điều này cho thấy mô hình VAST-EPU-N6409 có hiệu suất khai thác năng lượng gió rất cao khi hoạt động ở các tốc độ gió thông thường tại Việt Nam.

III.2.2. Mô hình mẫu cánh S1010

Các thông số cơ bản của mô hình biên dạng mẫu cánh S1010 ban đầu và mô hình biên dạng mẫu cánh mới được tối ưu hóa thu được từ việc áp dụng mô hình thiết kế đề xuất được thể hiện trong Bảng 3.3 và Hình 3.24.

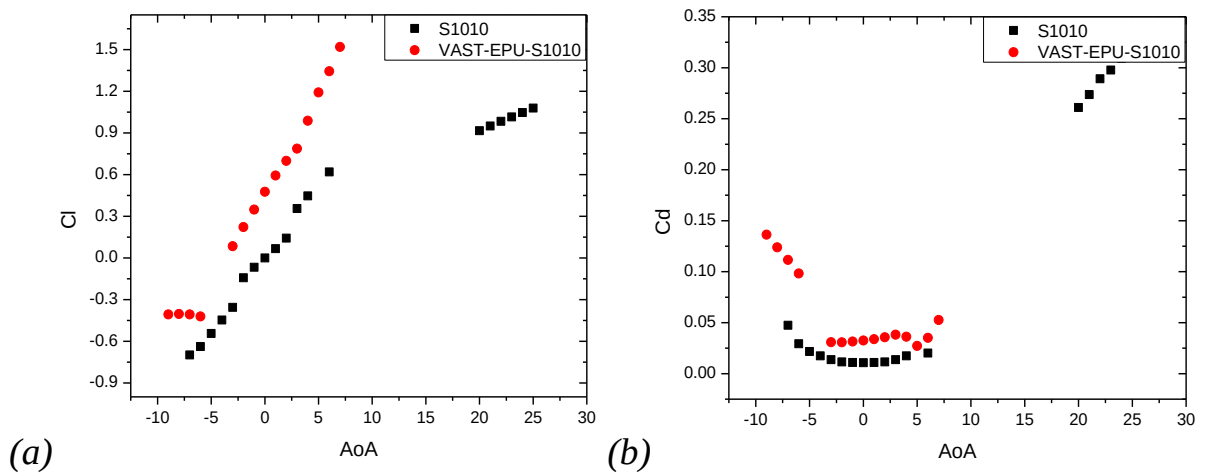
Bảng 3.3. Các thông số cơ bản của mô hình biên dạng mẫu cánh S1010 và mẫu cánh VAST-EPU-S1010

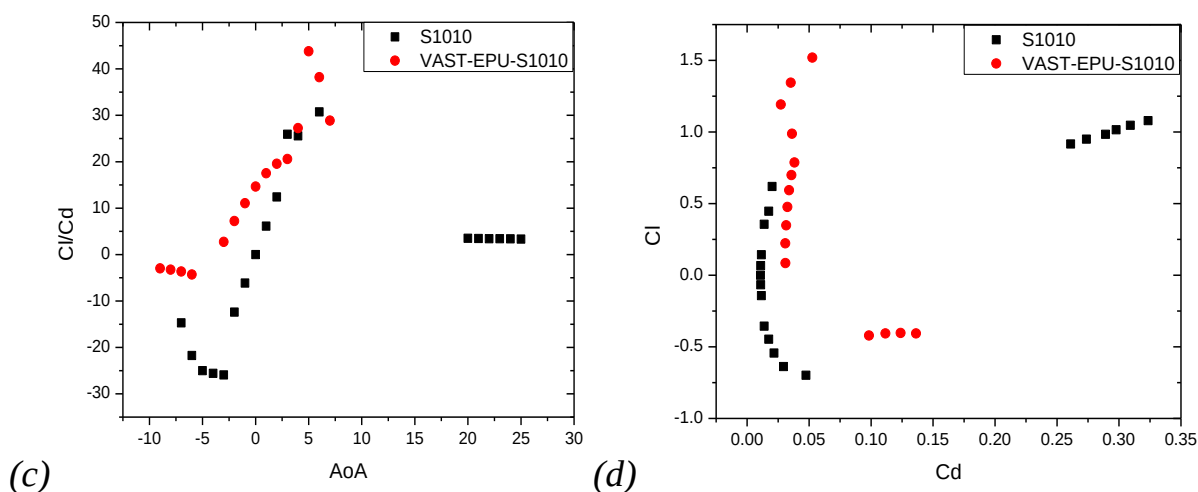
Thông số	S1010	VAST-EPU-S1010
MT	6.02%	8.00%
MTP	23.42%	20.32%
MC	0.00%	5.96%
MCP	0.00%	72.77%



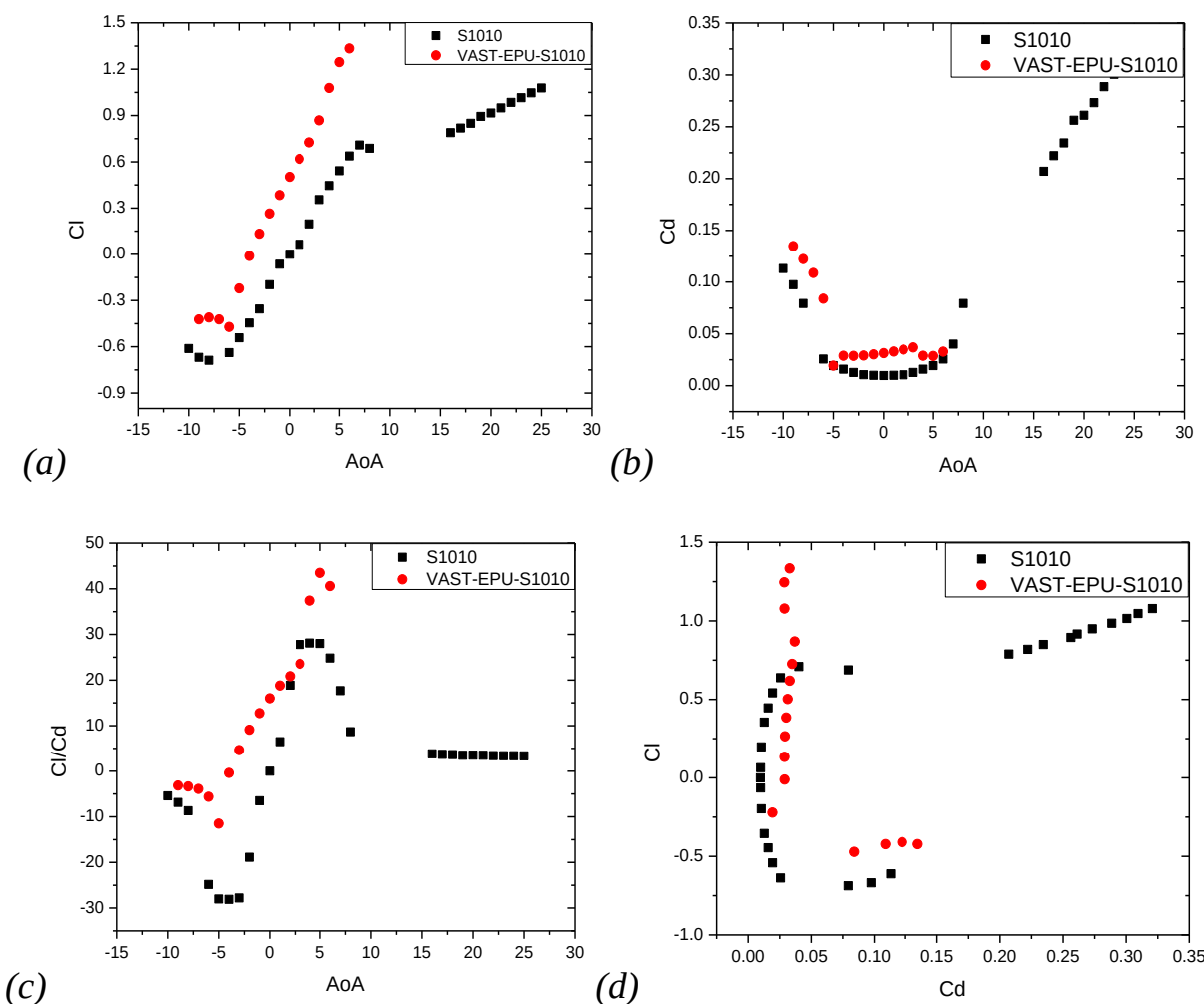
Hình 3.24. Hình dạng của mô hình biên dạng mẫu cánh S1010 và mẫu cánh VAST-EPU-S1010

Tương tự, các đồ thị thể hiện các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình biên dạng mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s được thể hiện trong Hình 3.25.





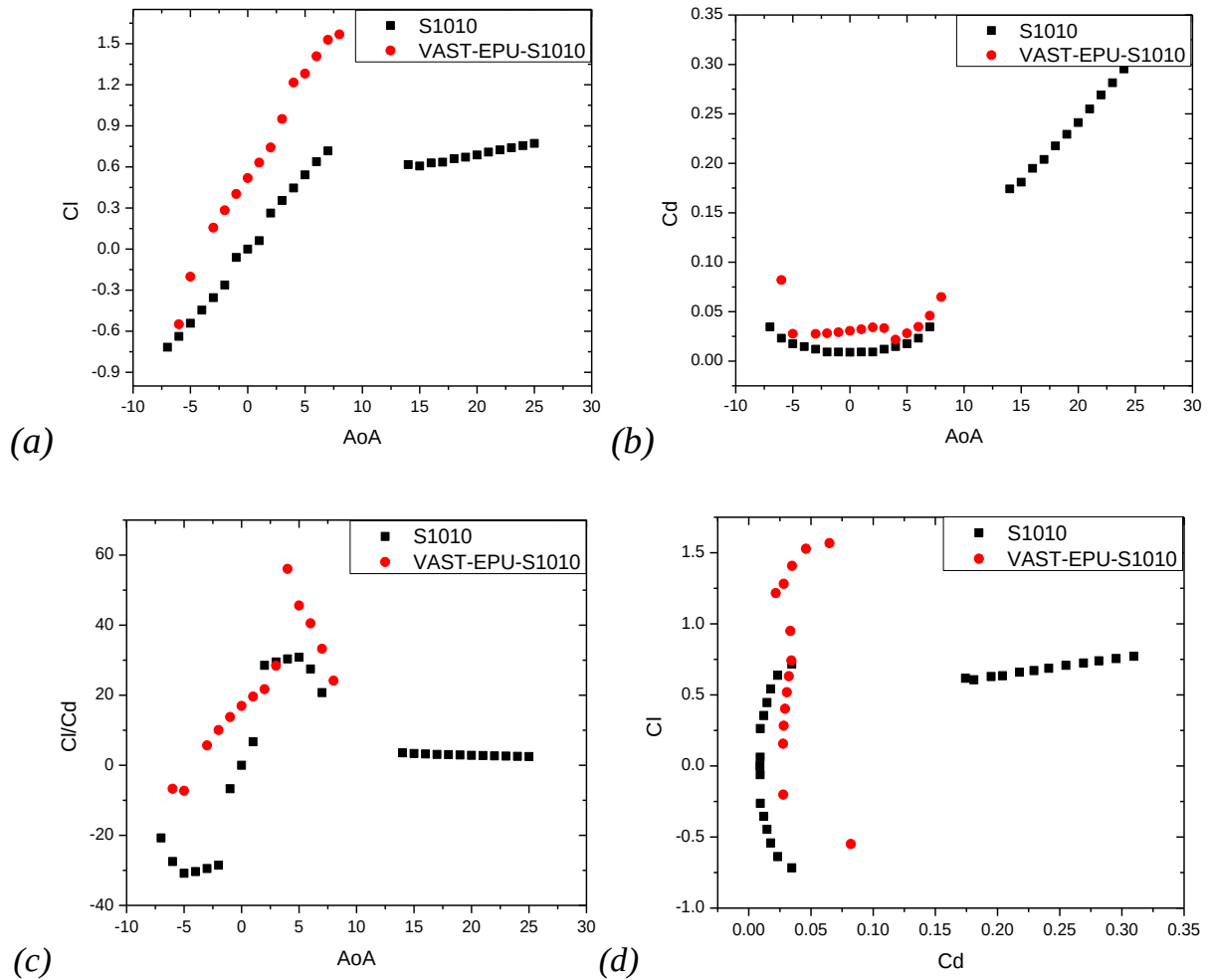
Hình 3.25. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU- S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s



Hình 3.26. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU- S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s

Đồ thị thể hiện các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình biên dạng mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s được thể hiện trong Hình 3.26.

Cuối cùng, đồ thị thể hiện các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản và tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s được trình bày trong Hình 3.27.



Hình 3.27. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s

Tóm lại, các kết quả cho thấy mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1010 có độ dày và độ cong lớn hơn so với mô hình mẫu cánh S1010. Khi hoạt động ở tốc độ gió từ 4,0 m/s đến 6,0 m/s. Giá trị C_l/C_d tối đa của mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1010 cao hơn mô hình mẫu cánh S1010 lần lượt là 35,7%, 40,2% và 45,5%. Điều

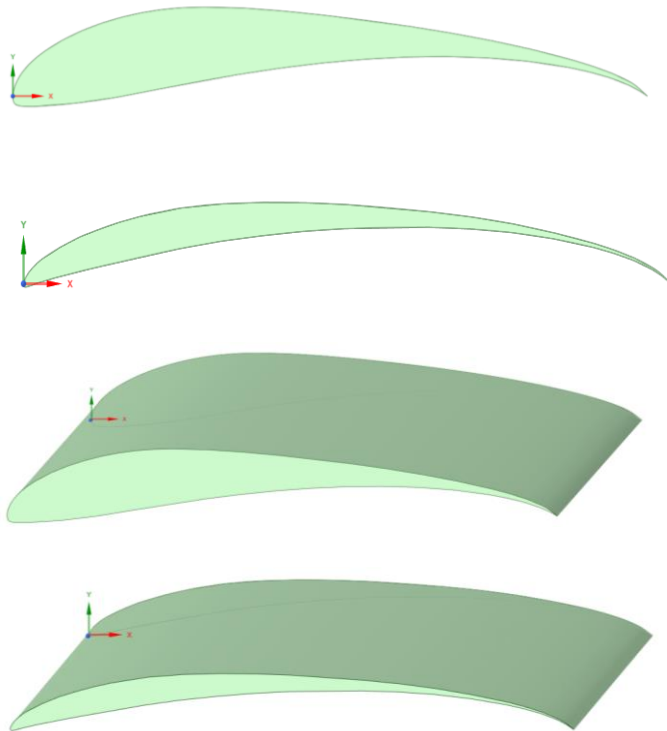
này cho thấy mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1010 cũng có hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt khi hoạt động ở các tốc độ gió thông thường tại Việt Nam.

III.2.3. Mô hình mẫu cánh S1223

Các thông số cơ bản của mô hình mẫu cánh S1223 ban đầu và mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1223 mới được tối ưu hóa thu được từ việc áp dụng mô hình thiết kế đề xuất được thể hiện trong Bảng 3.4 và Hình 3.28.

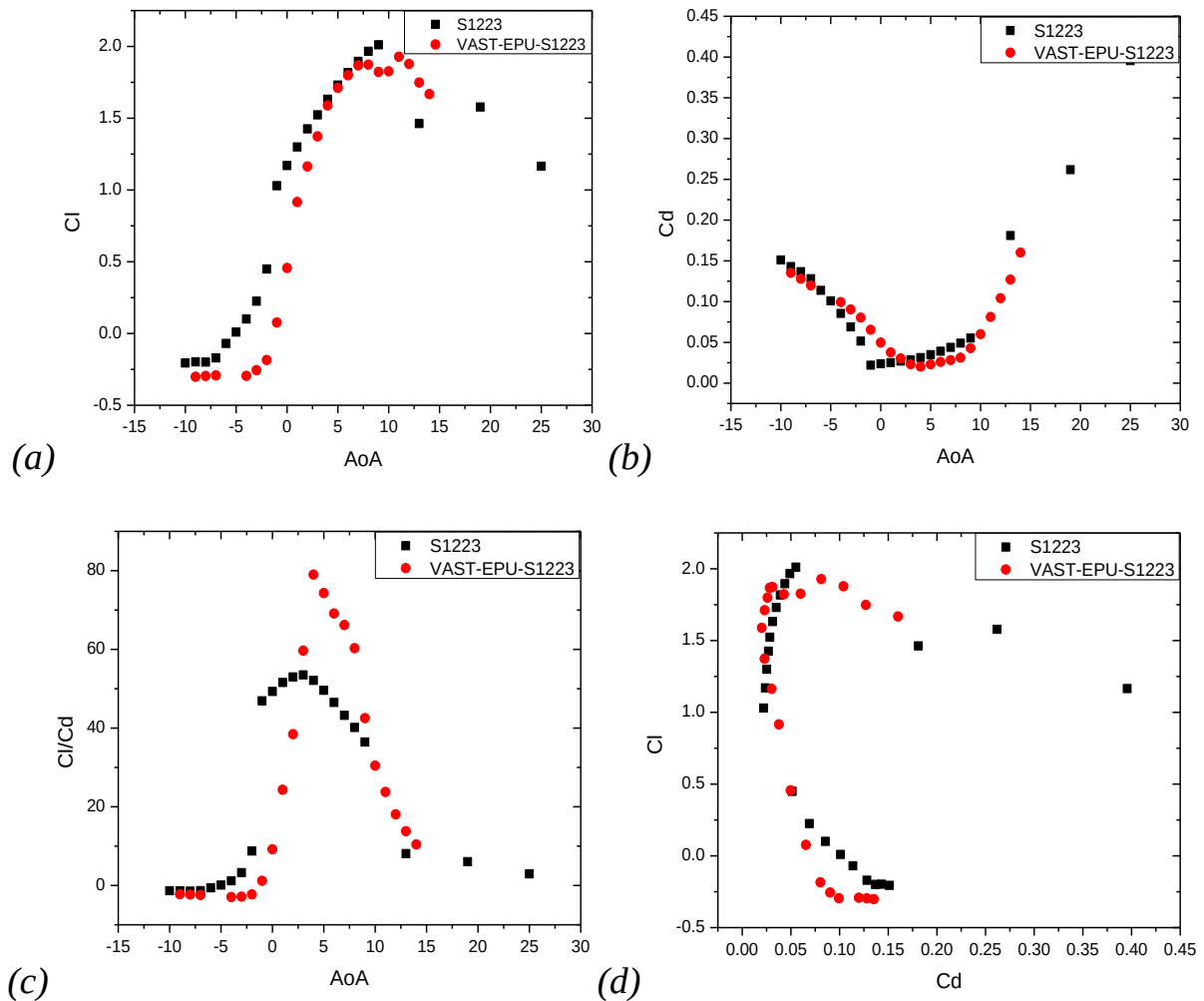
Bảng 3.4. Các thông số cơ bản của mô hình mẫu cánh S1223 và mẫu cánh VAST-EPU-S1223

Thông số	S1223	VAST-EPU-S1223
MT	12.14%	5.0%
MTP	20.12%	19.82%
MC	8.68%	8.16%
MCP	47.45%	48.65%



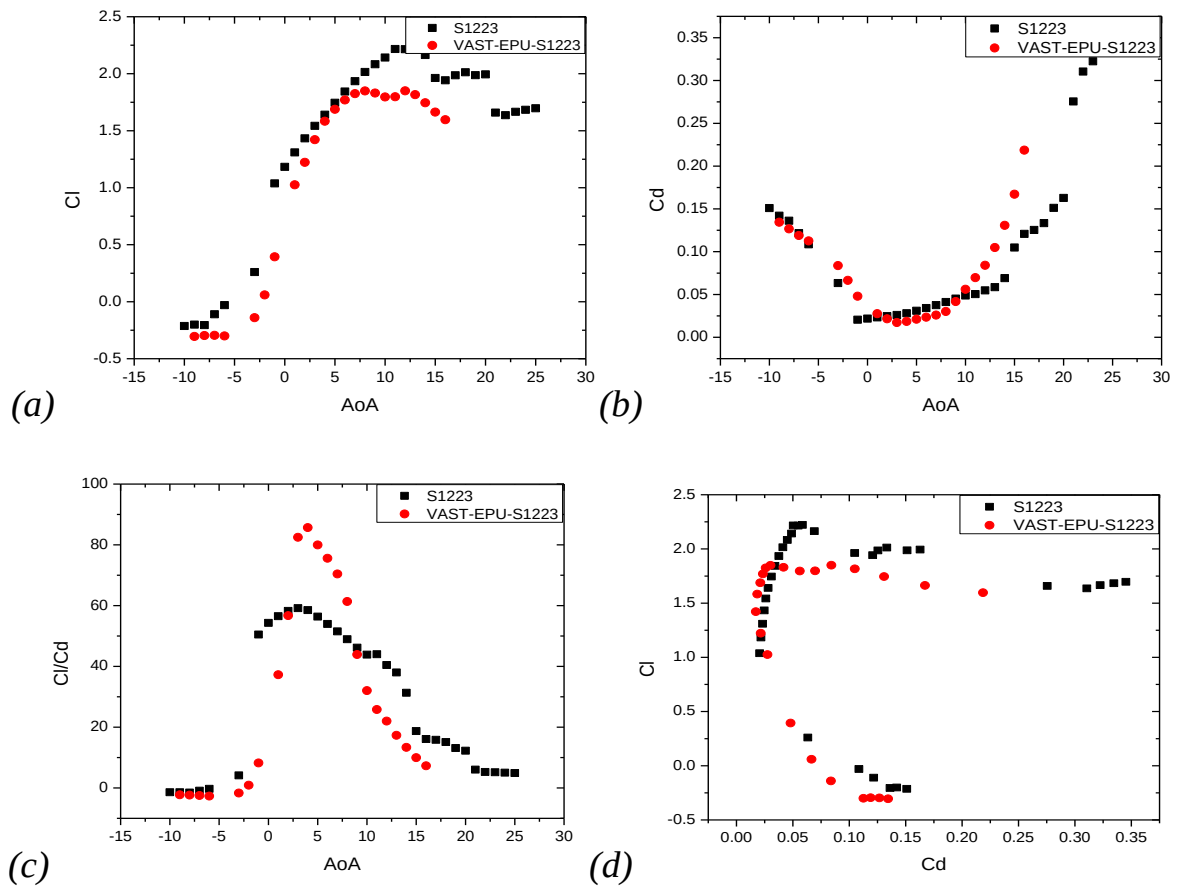
Hình 3.28. Hình dạng của mô hình biên dạng mẫu cánh S1223 và mẫu cánh VAST-EPU-S1223

Hình 3.29 thể hiện đồ thị biểu diễn các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s.



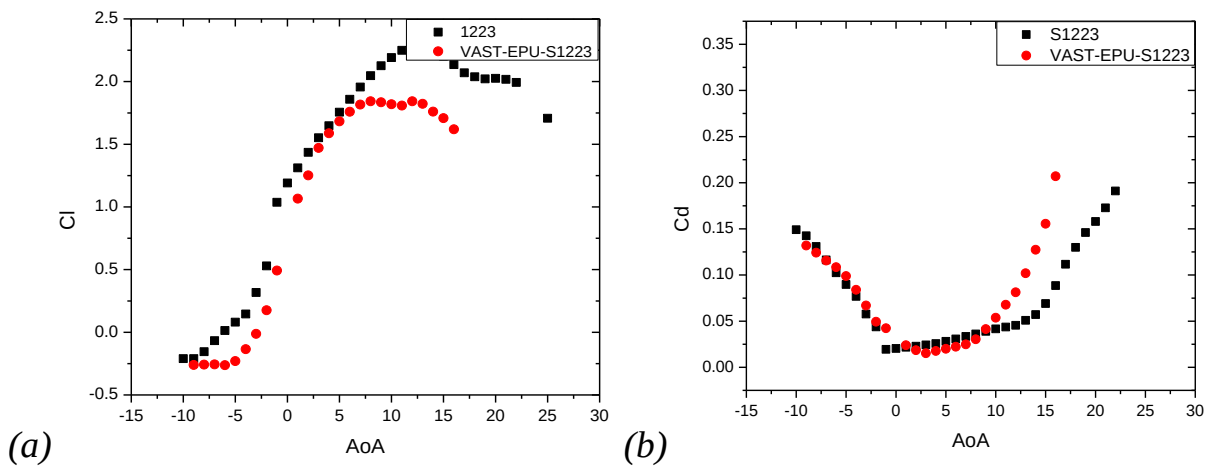
Hình 3.29. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1223 và VAST-EPU-S1223 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s

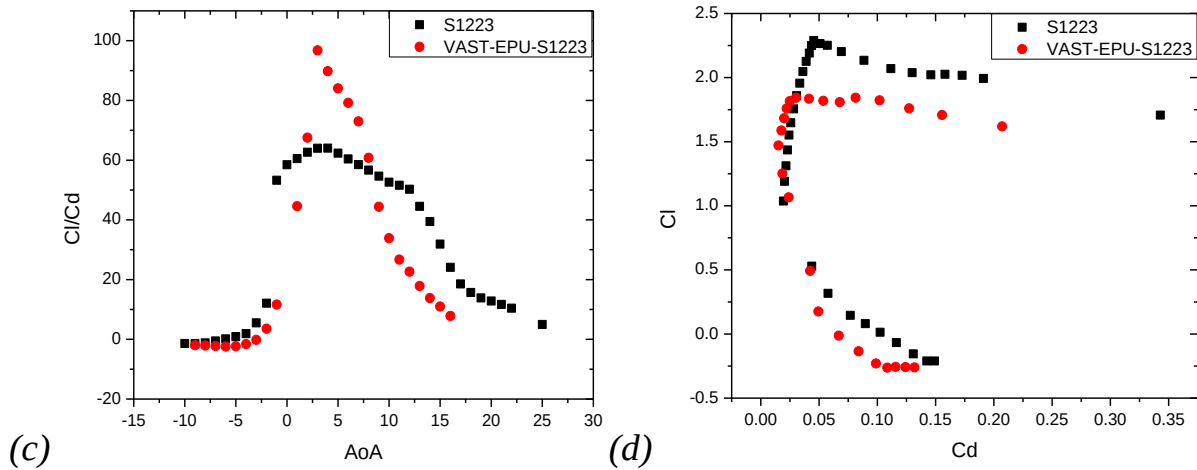
Hình 3.30 thể hiện đồ thị biểu diễn các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản, tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s.



Hình 3.30. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1223 và VAST-EPU-S1223 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s

Hình 3.31 trình bày đồ thị thể hiện các giá trị thu được của hệ số lực nâng, hệ số lực cản và tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản khi hai mô hình mẫu cánh này hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s.



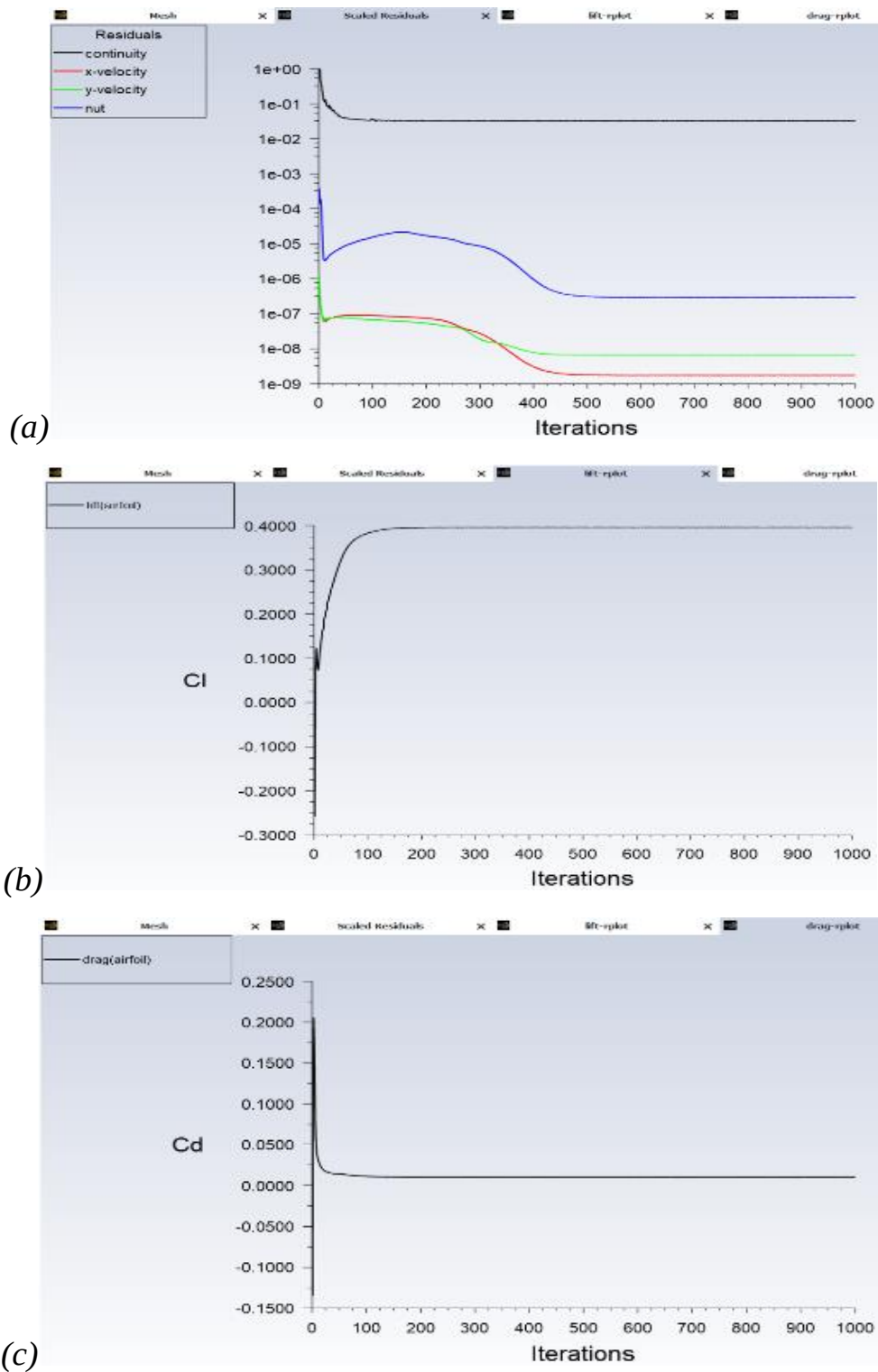


Hình 3.31. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1223 và VAST-EPU-S1223 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s

Sau khi phân tích và so sánh bằng phương pháp PM, các mô hình mẫu cánh tối ưu nhất đã được lựa chọn và đề xuất. Các thiết kế mẫu cánh mới này cho tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản lớn hơn các mô hình mẫu cánh ban đầu trung bình khoảng 10% đến 50%.

Tuy nhiên, từ các đồ thị, có thể thấy rằng ở một số điểm góc tấn công, các giá trị C_l , C_d không thu được. Điều này là do số lượng tấm phân chia là 149 và các điều kiện biên khác nhau khiến cho nghiệm của phương trình không hội tụ. Nếu muốn các điểm này hội tụ, cần phải phân bổ lại số lượng tấm theo từng giá trị góc tấn công khác nhau. Tuy nhiên, việc thiếu một số giá trị C_l , C_d ở một số điểm góc tấn công không ảnh hưởng đến đánh giá tổng thể về thiết kế của các mô hình mẫu cánh. Điều này cũng cho thấy rõ điểm yếu của phương pháp PM trong bài toán phân tích khí động học đối với các mô hình mẫu cánh. Biện pháp mẫu cánh càng phức tạp thì phương pháp PM lại càng khó để đạt được hội tụ tại các góc tấn công lớn.

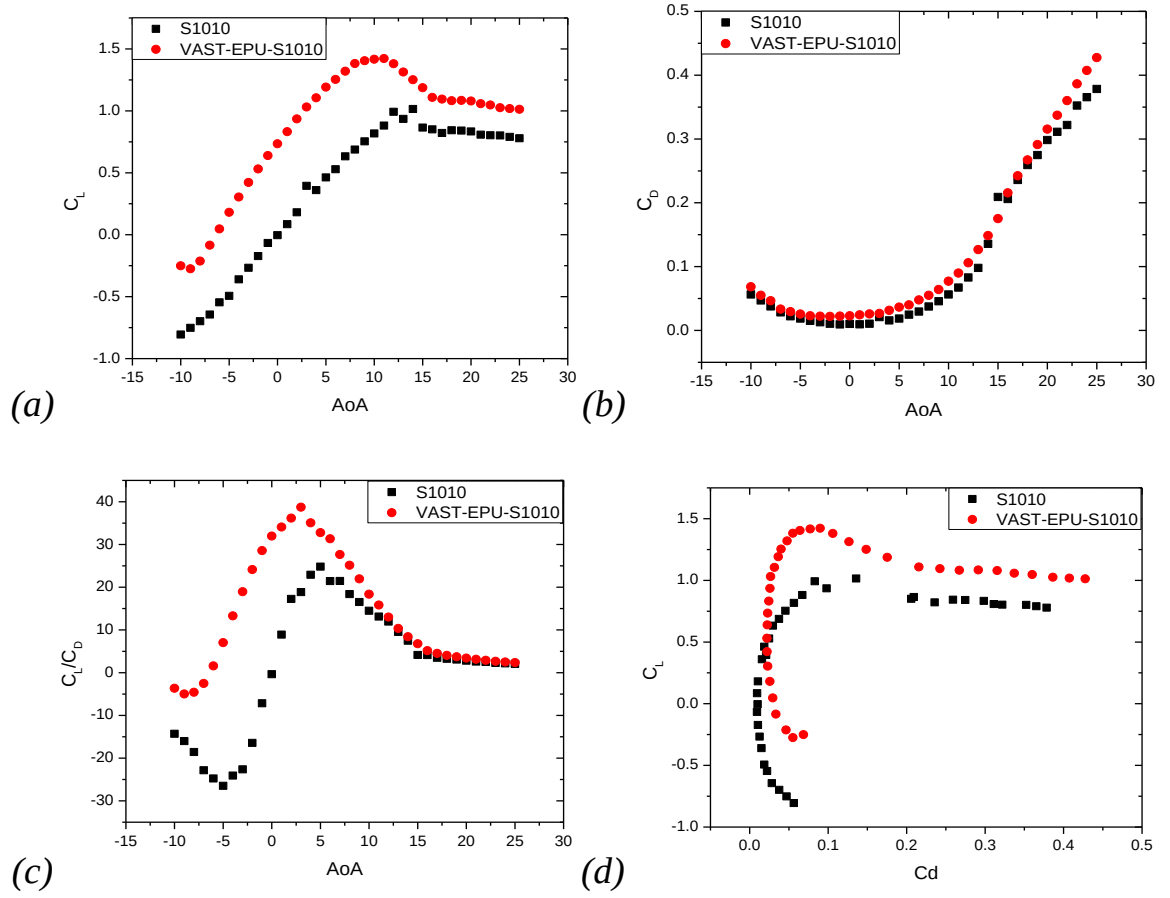
Để khắc phục nhược điểm của phương pháp PM, các mô hình mẫu cánh có tiềm năng tiếp tục được phân tích bằng phương pháp CFD để so sánh và xác nhận độ tin cậy của dữ liệu đã thu được trước đó.



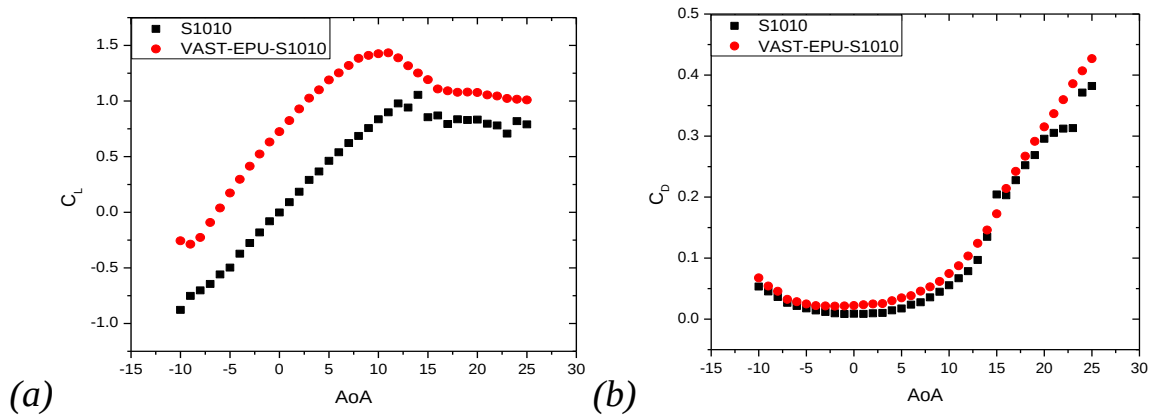
Hình 3.32. Sự thay đổi của các đại lượng theo số lần lặp: Sai số (a), hệ số lực nâng (b) và hệ số lực cản (c) theo các vòng lặp giải số

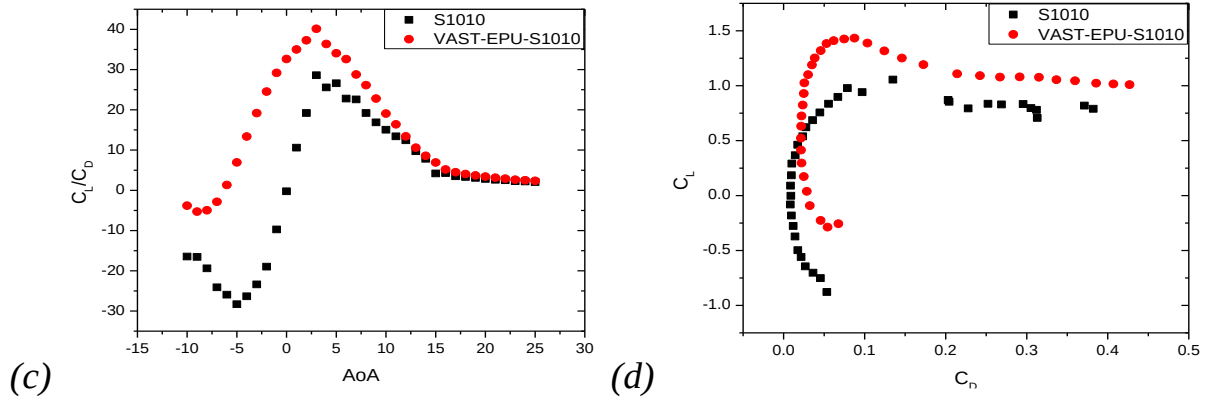
Các mô hình mô phỏng CFD và các bước thực hiện đối với các mô hình mẫu cánh là giống nhau. Sau đó, quá trình giải số được thực hiện, sự thay đổi của các đại lượng theo số lần lặp được thể hiện trong Hình 3.32. Khi các biến thiên gần như không đổi, điều đó có nghĩa là quá trình giải đã hội tụ và có thể dừng lại để

xử lý kết quả. Trong luận án này, kết quả phân tích của các mô hình mẫu cánh S1010 và mẫu cánh VAST-EPU-S1010 được trình bày như một ví dụ điển hình. Kết quả được thể hiện trong Hình 3.33, Hình 3.34, Hình 3.35.

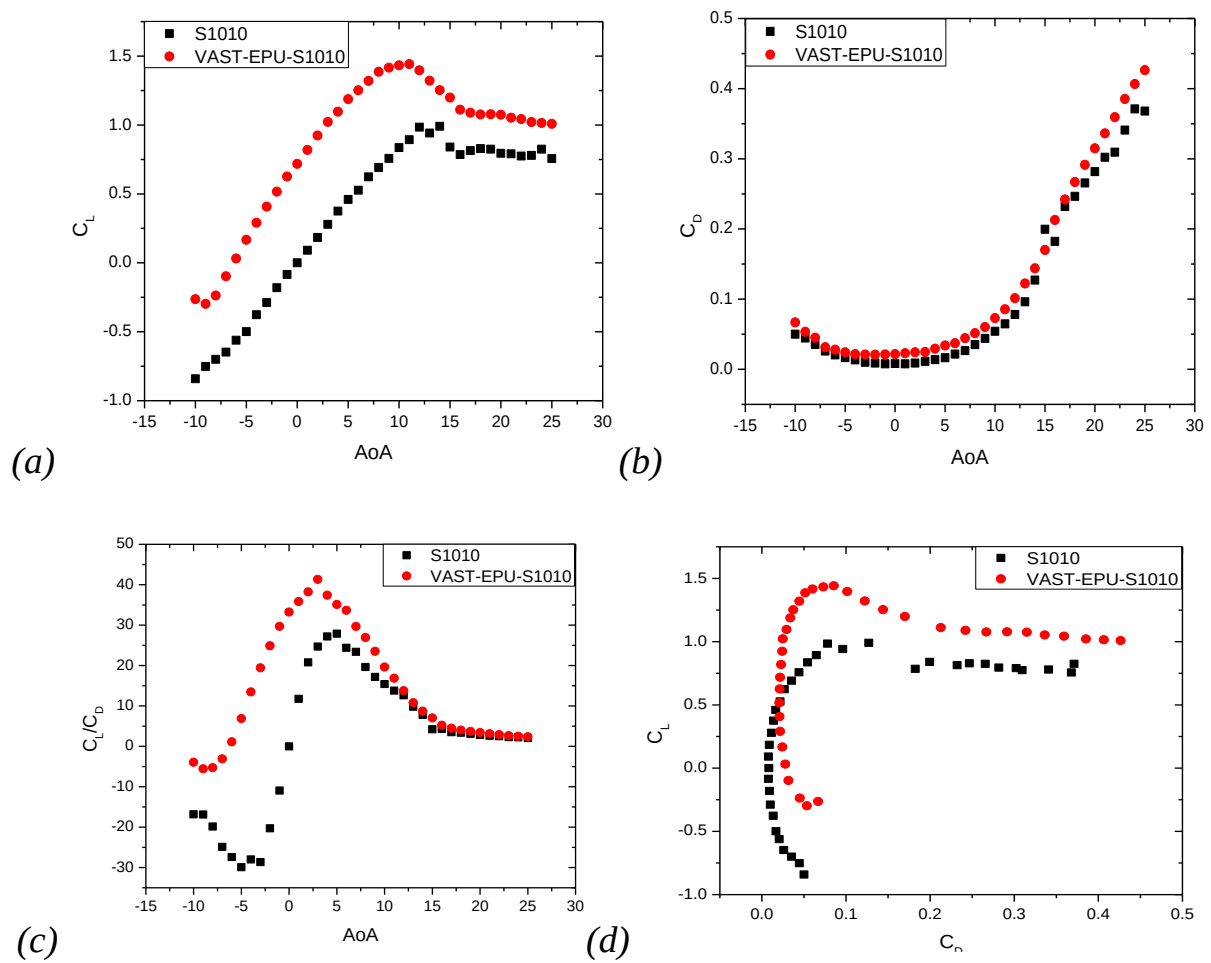


Hình 3.33. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 4,0 m/s





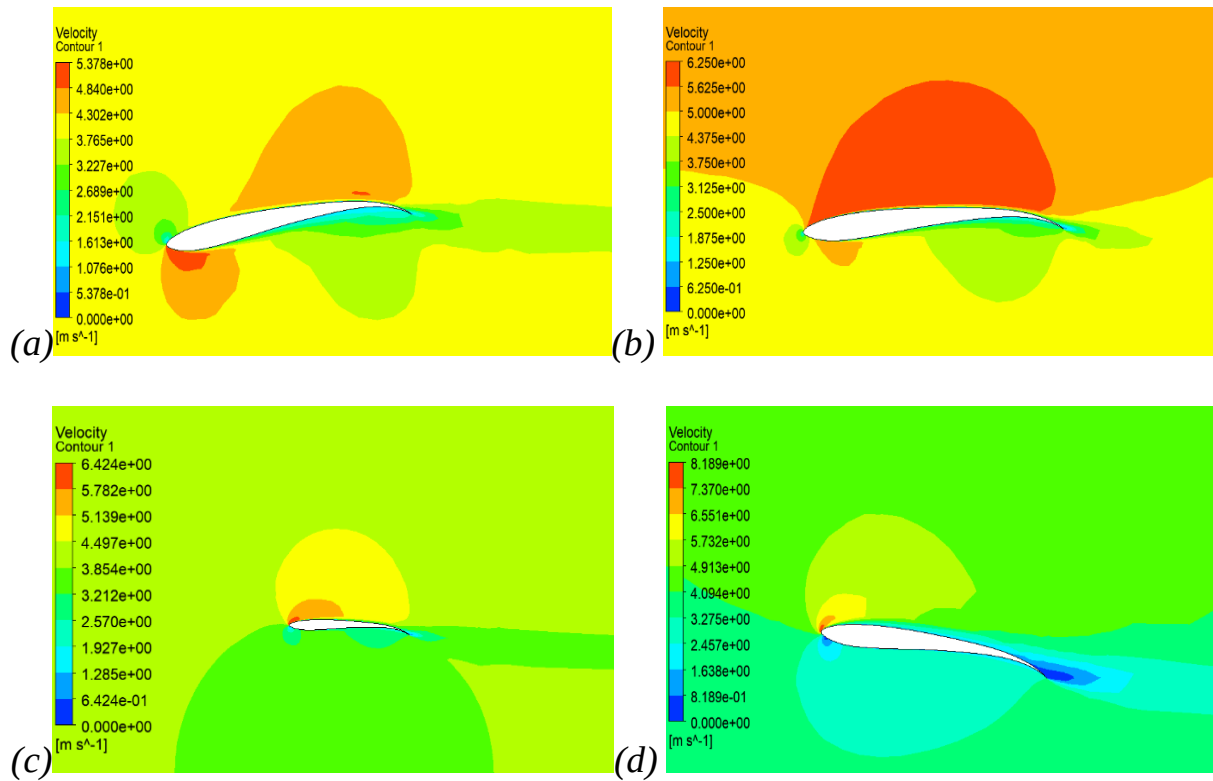
Hình 3.34. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s



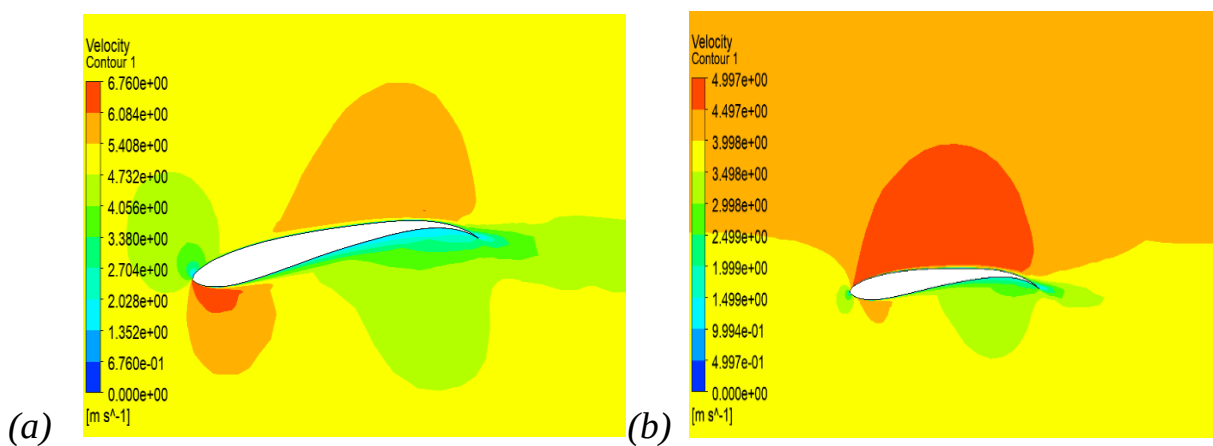
Hình 3.35. Các giá trị thu được của C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) của S1010 và VAST-EPU-S1010 khi hoạt động ở tốc độ gió 6,0 m/s

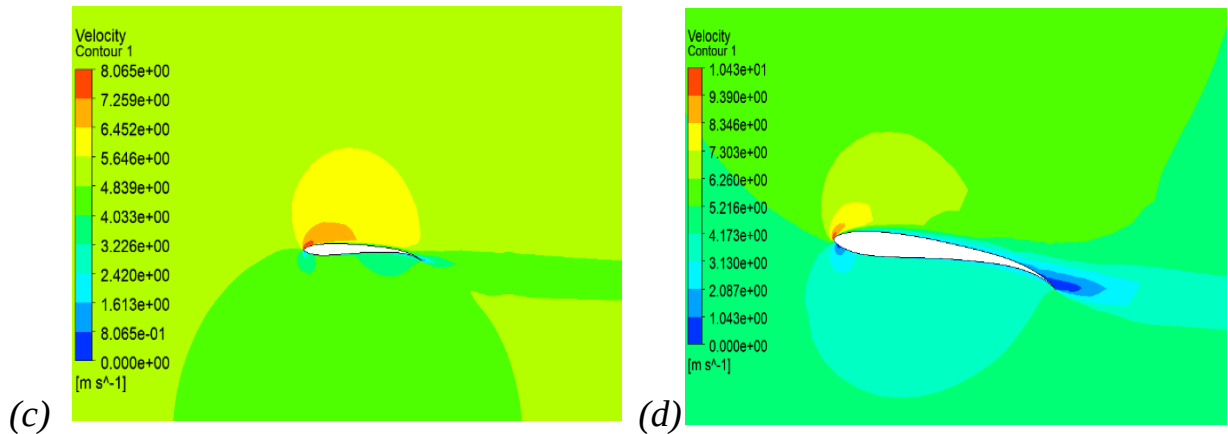
Bên cạnh đó, các kết quả thu được từ các mô hình phân tích CFD cũng có thể được trình bày dưới dạng hình ảnh trực quan, sinh động. Quá trình dòng chảy đi qua bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010, cùng với vị trí tách dòng và độ lớn

của các xoáy theo góc tấn công khác nhau được thể hiện rất rõ ràng. Đây là một lợi thế lớn của phương pháp CFD trong các vấn đề phân tích khí động học. Các kết quả này được thể hiện lần lượt trong Hình 3.36, Hình 3.37 và Hình 3.38.

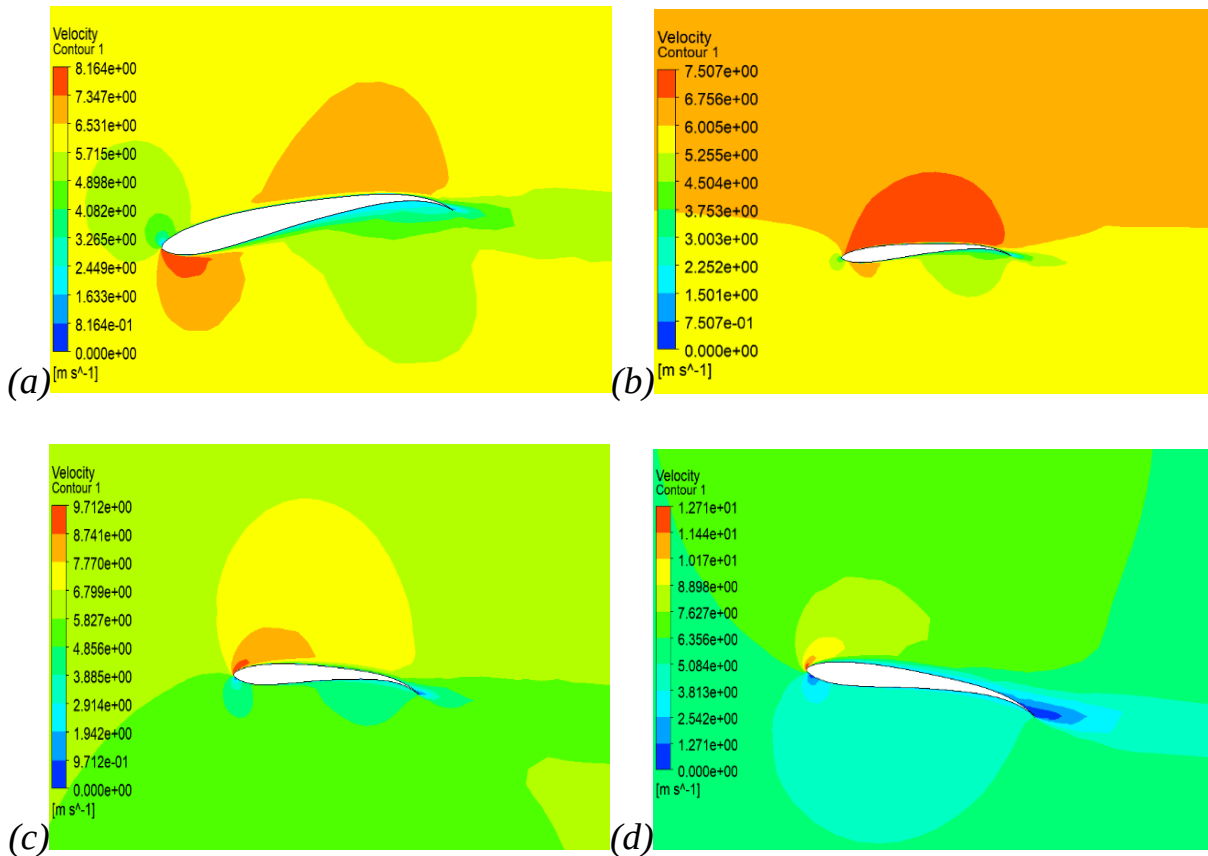


Hình 3.36. Đường đồng mức dòng khí và các dòng xoáy khi tương tác với bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010 với các góc: $AoA = -5^\circ$ (a), $AoA = 0^\circ$ (b), $AoA = 5^\circ$ (c), $AoA = 10^\circ$ (d) ở tốc độ gió 4,0 m/s





Hình 3.37. Đường đồng mức dòng khí và các dòng xoáy khi tương tác với bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010 với các góc: $AoA = -5^\circ$ (a), $AoA = -0^\circ$ (b), $AoA = 5^\circ$ (c), $AoA = 10^\circ$ (d) ở tốc độ gió 5,0 m/s



Hình 3.38. Đường đồng mức dòng khí và các dòng xoáy khi tương tác với bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010 với các góc: $AoA = -5^\circ$ (a), $AoA = -0^\circ$ (b), $AoA = 5^\circ$ (c), $AoA = 10^\circ$ (d) ở tốc độ gió 6,0 m/s

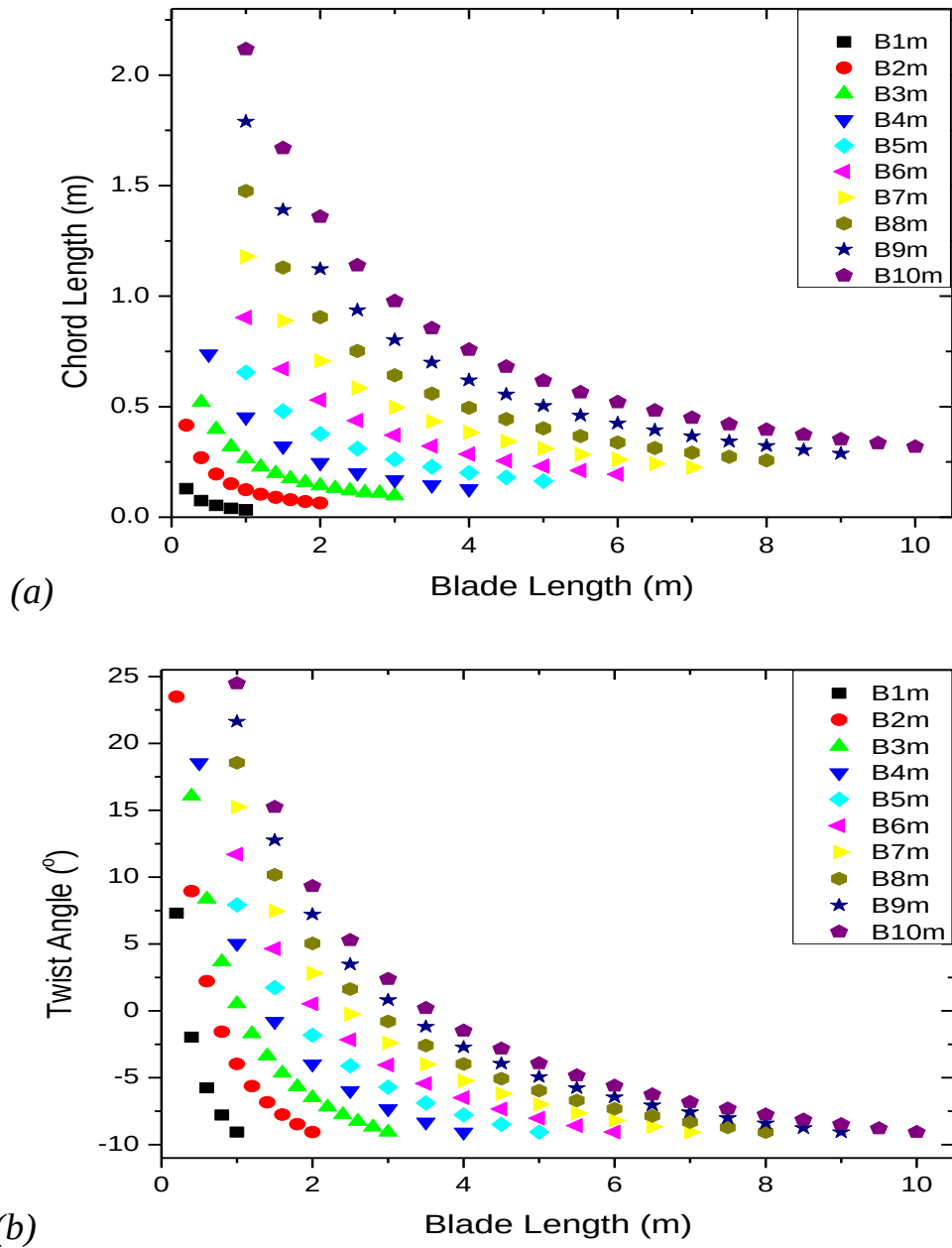
Từ các kết quả thu được, phương pháp CFD đã cho kết quả đáng tin cậy hơn so với phương pháp PM. Thông qua các kết quả thu được từ phân tích CFD,

một lần nữa khẳng định rằng các mô hình biên dạng mẫu cánh mới được đề xuất trong luận án này có thể đạt được tỉ số hệ số lực nâng trên hệ số lực cản cao hơn nhiều so với các mô hình mẫu cánh ban đầu khi hoạt động với tốc độ gió phổ biến ở Việt Nam. Các mô hình mẫu cánh mới này sẽ được lựa chọn để tiếp tục xây dựng thiết kế biên dạng cánh tuabin hoàn chỉnh.

III.2.4. Thiết kế biên dạng cánh tuabin hoàn chỉnh

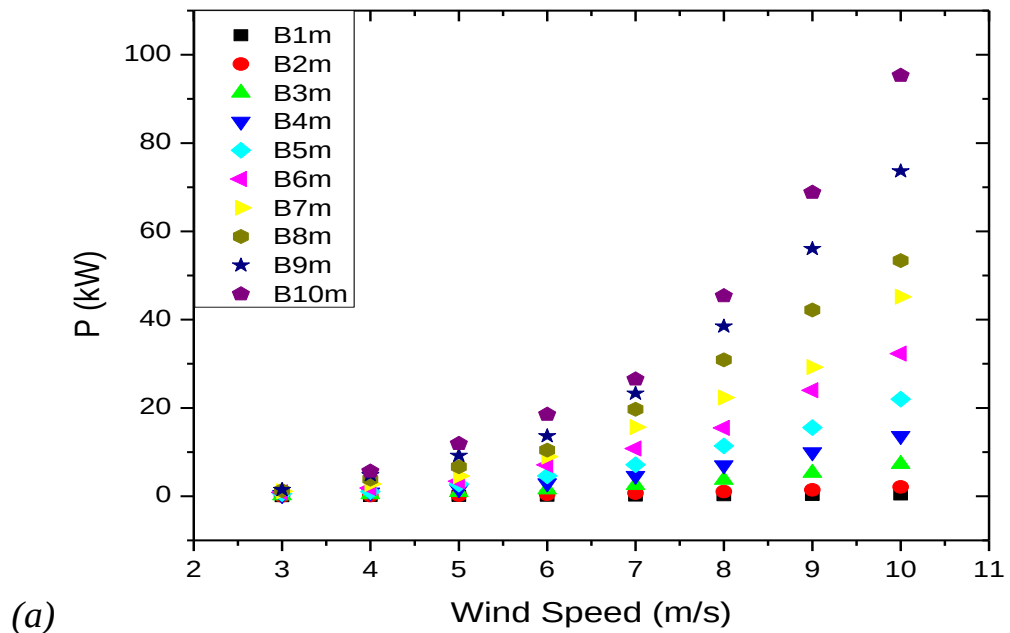
Theo mô hình thiết kế như thể hiện trong Hình 3.15, 7 bước đầu tiên giúp thiết kế các mô hình biên dạng mẫu cánh cho tỉ số C_l/C_d lớn nhất. Từ bước 8 đến bước 11, các mô hình biên dạng mẫu cánh này sẽ được sắp xếp theo các kích thước và góc xoắn khác nhau tùy thuộc vào bán kính rôto. Mục tiêu cuối cùng là tìm ra các biên dạng cánh hoàn chỉnh cho hệ số công suất lớn nhất trong điều kiện hoạt động cụ thể của tuabin. Trong số các mô hình biên dạng mẫu cánh mới, VAST-EPU-S1223 tiếp tục được sử dụng để thiết kế các cánh tuabin hoàn chỉnh dựa trên lý thuyết BOM.

Trước hết, để có cơ sở kiểm chứng tính ưu việt của các mô hình biên dạng mẫu cánh mới này. Cần thiết phải có sự so sánh với thiết kế mẫu cánh nổi tiếng trước đó. Do đó, mô hình biên dạng mẫu cánh SG6043 được sử dụng để thiết kế tối ưu biên dạng cánh tuabin hoạt động trong phạm vi tốc độ gió từ 3,0 m/s đến 10,0 m/s theo lý thuyết BOM. Mô hình biên dạng mẫu cánh SG6043 được biết đến là mô hình có hiệu suất khai thác năng lượng gió rất cao và đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới nghiên cứu. Các cánh quạt sử dụng biên dạng mẫu cánh SG6043 sẽ có chiều dài khác nhau, từ 1,0 m đến 10,0 m. Theo lý thuyết BOM, mối quan hệ giữa chiều dài, góc xoắn của các phần mẫu cánh và chiều dài toàn bộ cánh quạt khi sử dụng SG6043 được thể hiện trong Hình 3.39.

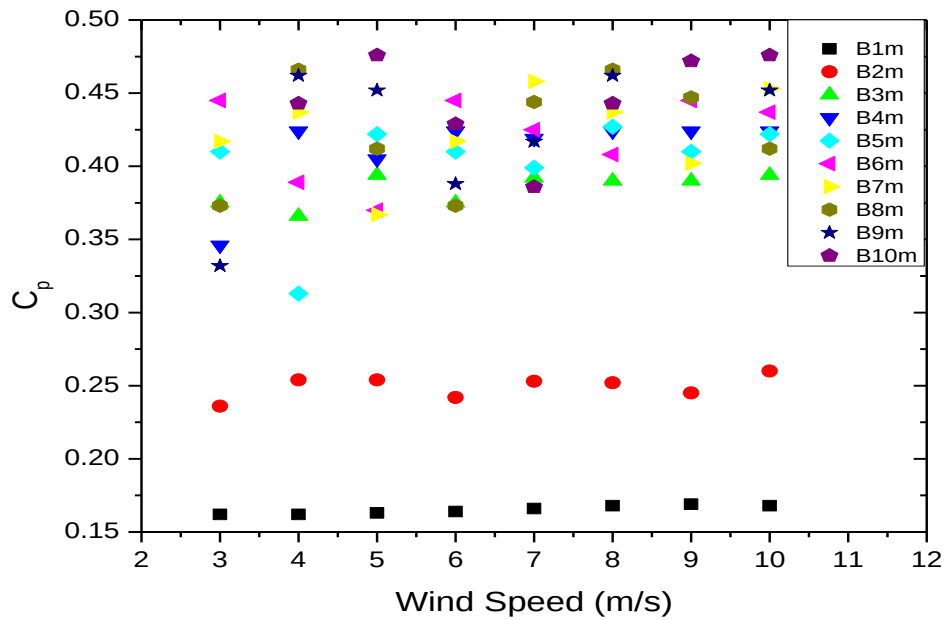


Hình 3.39. Mối liên hệ giữa chiều dài (a), góc xoắn (b) của các phần mẫu cánh SG6043 và chiều dài toàn bộ cánh quạt

Các cánh quạt này sau đó được sử dụng để thiết kế các tuabin trục ngang 3 cánh. Các thông số hoạt động của tuabin như TSR và tốc độ quay của rôto được điều chỉnh trong phạm vi rộng. Giá trị TSR thay đổi từ 0 đến 12, tốc độ quay của rôto thay đổi từ 30 vòng/phút đến 360 vòng/phút. Các thông số hoạt động của tuabin được mô tả bằng LLFVWM kết hợp với BEM trong Qblade. Cuối cùng, các giá trị hệ số công suất tối đa và công suất điện đầu ra tối đa của các tuabin so với tốc độ gió được thể hiện trong Hình 3.40.



(a)

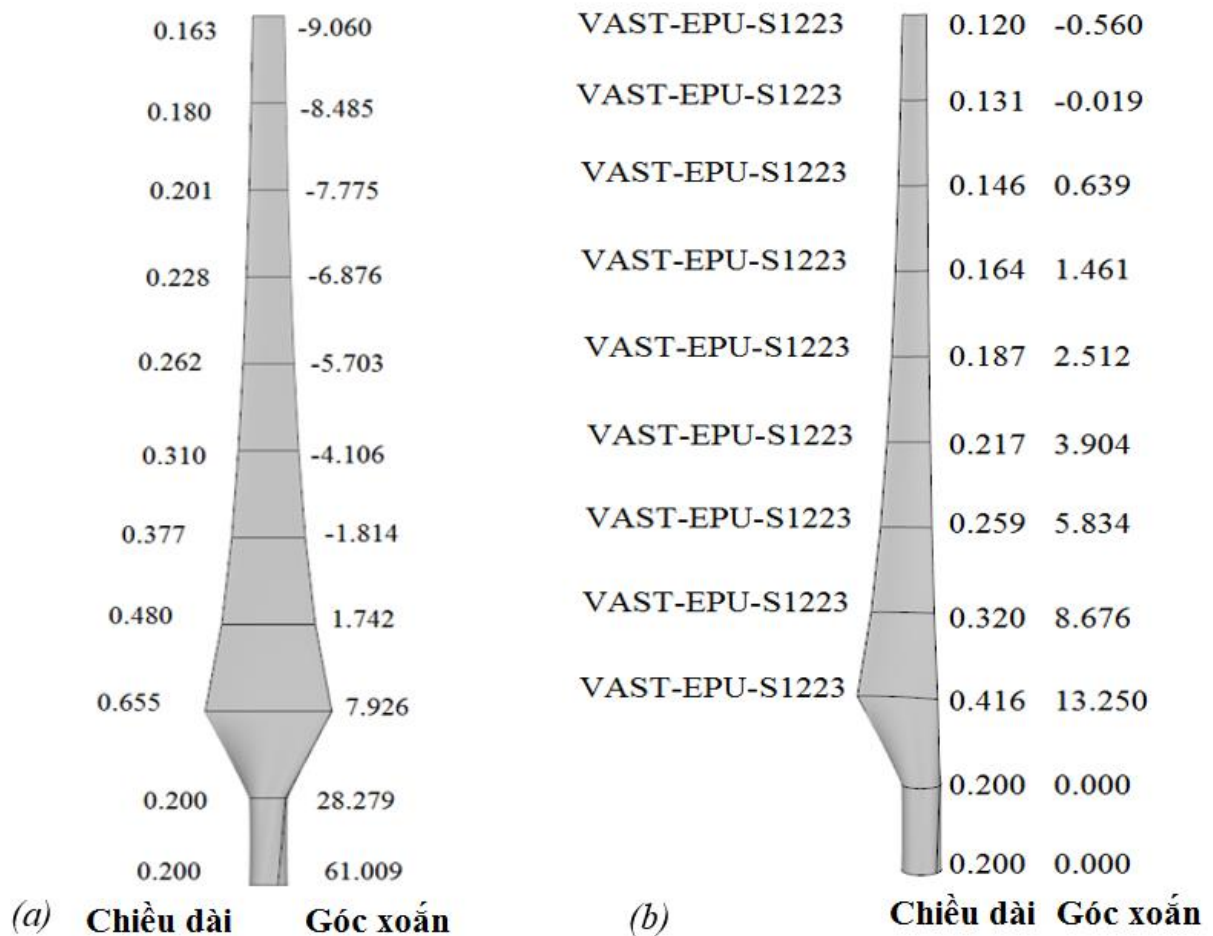


(b)

Hình 3.40. Công suất điện đầu ra tối đa (a) và hệ số công suất tối đa (b) của các tuabin sử dụng SG6043 theo tốc độ gió

Từ dữ liệu trong Hình 3.40 (a), chiều dài cánh tuabin càng dài thì công suất điện đầu ra càng lớn. Tuy nhiên, theo Hình 3.40 (b), rõ ràng là giá trị C_p của tuabin tăng lên khi chiều dài cánh tăng từ 0,0 m đến 8,0 m khi hoạt động ở tốc độ gió nhỏ hơn 8,0 m/s. Sau đó, các giá trị C_p sẽ giảm khi chiều dài cánh tiếp tục tăng. Điều này cho thấy rõ ràng rằng các tuabin hoạt động ở tốc độ gió phổ biến tại Việt Nam chỉ nên được thiết kế với chiều dài cánh tối đa là 8,0 m để đạt được giá trị C_p tối đa. Đối với cánh tuabin sử dụng mẫu SG6043, C_p có thể đạt được giá trị lớn nhất khoảng 48% khi hoạt động ở tốc độ gió từ 4,0 m/s đến 8,0 m/s. Khi xem

xét tốc độ gió từ 4,0 m/s đến 6,0 m/s, tuabin có chiều dài cánh 5,0 m cho hệ số công suất lớn nhất, $C_{pmax}=47,6\%$. Công suất điện đầu ra lớn nhất là 2,75 kW khi hoạt động ở tốc độ gió 5,0 m/s. Thiết kế của tuabin này được phân loại là tuabin nhỏ, thích hợp sử dụng cho các hộ gia đình ở vùng nông thôn, rừng và đảo. Các thông số thiết kế của biên dạng cánh dài 5,0 m này được thể hiện trong Hình 3.41 (a).



Hình 3.41. Thông số thiết kế của cánh tuabin dài 5,0 m sử dụng mô hình mẫu cánh SG6043 (a) và mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1223 (b)

Từ kết quả thu được trong nghiên cứu với biên dạng mẫu cánh SG6043, mô hình mẫu cánh VAST-EPU-S1223 sẽ được thiết kế tương tự với chiều dài cánh 5,0 m. Các thông số thiết kế và biên dạng của cánh này được thể hiện trong Hình 3.41 (b). Trong điều kiện tương tự như trường hợp cánh quạt SG6043, công suất điện tối đa của tuabin sử dụng VAST-EPU-S1223 là 3,05 kW, với hệ số công suất tối đa lên đến 50,5%. Giá trị hệ số công suất này lớn hơn khoảng 1,59 lần so với

mô hình cánh quạt S1223 ban đầu và lớn hơn 1,11 lần so với mô hình cánh SG6043 trong cùng điều kiện hoạt động với tốc độ gió 5,0 m/s. Trên thực tế, các tuabin thương mại tốt nhất hiện nay chỉ có thể đạt được giá trị hệ số công suất khoảng 45% đến 48%. Qua đó, một lần nữa có thể khẳng định mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin được đề xuất trong luận án này có thể giúp cải tiến và mang lại các thiết kế biên dạng cánh tuabin cho hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt hơn.

Một trong những mục tiêu chính của luận án là phát triển mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin để đạt hiệu quả khai thác năng lượng gió tốt trong phạm vi tốc độ gió thông thường từ 4,5 - 6,5 m/s. Thông qua các kết quả thu được, một số thiết kế cánh VAST-EPU kích thước nhỏ (chiều dài cánh dưới 10,0 m) đã được xác định.

Để sản xuất những cánh này, cần nhiều nghiên cứu sâu hơn liên quan đến các vấn đề phân tích kinh tế- kỹ thuật, cụ thể là công nghệ sản xuất, vật liệu và chi phí. Những nghiên cứu này đang được lên kế hoạch cho giai đoạn nghiên cứu tiếp theo của luận án này. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã được công bố bởi các nhóm nghiên cứu khác có liên quan cụ thể như sau:

- Theo Suresh [70], một thiết kế tuabin nhỏ 100W đã được chế tạo bằng công nghệ in 3D sử dụng vật liệu Axit Polylactic (PLA). Tuabin này sử dụng mô hình biên dạng cánh SD7080, tương tự như các mô hình VAST-EPU. Cánh quạt làm từ 100% vật liệu PLA sẽ có mật độ $1,25 \text{ kg/m}^3$, mô đun Young là $3,0 \text{ N/m}^2$ và tỉ số Poisson là 0,552. Khi hoạt động ở tốc độ gió 8,0 m/s, cánh quạt PLA chịu ứng suất $3,73 \times 10^6 \text{ Pa}$ và ở tốc độ gió 15,0 m/s, cánh quạt chịu ứng suất $1,31 \times 10^7 \text{ Pa}$. Điều này xác nhận tính toàn vẹn cấu trúc và tải trọng môi của cánh quạt trong điều kiện hoạt động dưới thời tiết khắc nghiệt.

- Theo Mohammad [71], chi phí sản xuất tuabin có bán kính rôto 0,117 m sử dụng vật liệu PLA bằng công nghệ in 3D là 43,71 \$. Chi phí tính theo khối lượng rôto là 124,18 \$/kg.

- Theo Jakub [72], tuabin nhỏ có tiềm năng kinh tế cao ở Ba Lan với điều kiện tuổi thọ hoạt động 20 năm. Trong số đó, tuabin nhỏ 3,0 kW, tốc độ gió định mức 5,0 m/s là hiệu quả nhất. Chi phí đầu tư trung bình là 3.367,5 \$/kW; chi phí vận hành trung bình là 84,1 \$/kW/năm; tỉ lệ chiết khấu là 6,0%. Từ đó, LCOE trung bình của tuabin nhỏ là 336,4 \$/MWh. Rõ ràng, LCOE của tuabin nhỏ vẫn cao hơn khoảng 4,0 lần so với tuabin lớn thương mại hiện nay.

Tóm lại:

Để thiết kế hoặc lựa chọn thiết kế tuabin phù hợp cho khu vực phát triển dự án điện gió trên bờ, cần thực hiện hai nội dung chính bao gồm: Xác định đặc điểm địa hình và tài nguyên gió trong khu vực trang trại theo các vị trí và độ cao khác nhau; tính toán thiết kế hoặc lựa chọn thiết kế tuabin phù hợp với đặc điểm địa hình và tài nguyên gió để đạt được giá trị hệ số công suất lớn nhất. Mô hình thiết kế đề xuất trong luận án này kết hợp các ưu điểm mạnh mẽ của cả mô hình lý thuyết và mô phỏng số. Kết quả thu được có độ tin cậy cao và trực quan.

Đối với các khu vực có tốc độ gió trung bình cao, cánh tuabin thường được thiết kế dài hơn, các mô hình biên dạng cánh được sử dụng cũng có MT lớn và MC nhỏ. Đối với tốc độ gió thực tế ở Việt Nam, chủ yếu từ 4,5 m/s đến 6,5 m/s, chiều dài cánh tuabin nên được thiết kế trong khoảng từ 4,0 m đến 8,0 m. Các mô hình biên dạng cánh được sử dụng nên có MT nhỏ ($MT < 10\%$) và MC lớn ($MC > 10\%$) để đạt được giá trị hệ số công suất lớn nhất. Điều này đảm bảo việc khai thác năng lượng gió hiệu quả nhất đối với tuabin. Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin trong luận án này nhằm tìm ra các thiết kế cánh mang lại hiệu suất tốt nhất cho các tốc độ gió phổ biến ở Việt Nam. Các phương pháp được sử dụng để thiết kế và phân tích là FIDM, PM và CFD. Nếu mô hình này được sử dụng để thiết kế cánh cho các vùng có tốc độ gió cao, thì vẫn đáp ứng được các yêu cầu. Tuy nhiên, tại trường hợp này, phương pháp PM sẽ không còn có thể tham gia vào khảo sát ban đầu do gặp phải sai số lớn và không hội tụ. Tất cả các phân tích khí động học với mô hình cánh phải được thực hiện bằng phương pháp CFD. CFD là một phương pháp đòi hỏi nhiều thời gian để thực hiện. Mỗi mô hình phân tích

có thể mất hàng giờ. Do đó, việc áp dụng mô hình được đề xuất trong luận án này cho các vùng có tốc độ gió cao là hoàn toàn khả thi, nhưng thời gian thực hiện sẽ dài hơn.

Rõ ràng, mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin được đề xuất trong luận án này có thể giúp thiết kế biên dạng cánh tuabin để đạt hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt nhất theo đặc điểm địa hình và nguồn gió trong các khu vực phát triển trang trại gió. Công suất điện đầu ra của các tuabin này sẽ là các thông số đầu vào quan trọng của bài toán thiết kế cấu hình trang trại gió. Sau khi các tuabin được thiết kế sao cho phù hợp nhất với đặc điểm địa hình và nguồn gió, vấn đề tiếp theo cần giải quyết là cấu hình vị trí lắp đặt các tuabin này trong khu vực trang trại gió. Bởi vì, khi các tuabin hoạt động, chúng sẽ gây ra tổn thất tốc độ gió và làm tăng cường độ chảy rối. Những tác động này sẽ gây ra tổn thất năng lượng cho các tuabin lân cận trong cùng một trang trại. Ngoài ra, các yếu tố địa hình cũng gây ra tổn thất năng lượng và cường độ chảy rối của dòng gió đến. Vấn đề thiết kế cấu hình trang trại gió để đạt được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý sẽ được giải quyết trong Chương IV.

CHƯƠNG IV. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ CẤU HÌNH TRANG TRẠI ĐIỆN GIÓ TRÊN BỜ

IV.1. Xây dựng mô hình thiết kế cấu hình trang trại điện gió trên bờ

Khi một khu vực trên đất liền được xác định là có tiềm năng và được quy hoạch phát triển dự án điện gió, việc khai thác hiệu quả nhất nguồn năng lượng gió trên khu vực đó là rất cần thiết. Hiệu quả khai thác năng lượng gió phụ thuộc chủ yếu vào các yếu tố như đặc điểm tài nguyên gió, thiết kế tuabin và cấu hình bố trí tuabin trong trang trại điện gió. Đặc điểm tài nguyên gió sẽ thay đổi liên tục tùy thuộc vào địa hình và cách bố trí tuabin như đã phân tích ở các phần trước. Khi gió va chạm với các vật cản, nó sẽ tạo ra các dòng xoáy, gây ra nhiễu loạn và tổn thất năng lượng của dòng chảy, cuối cùng sẽ làm giảm công suất điện đầu ra của các tuabin.

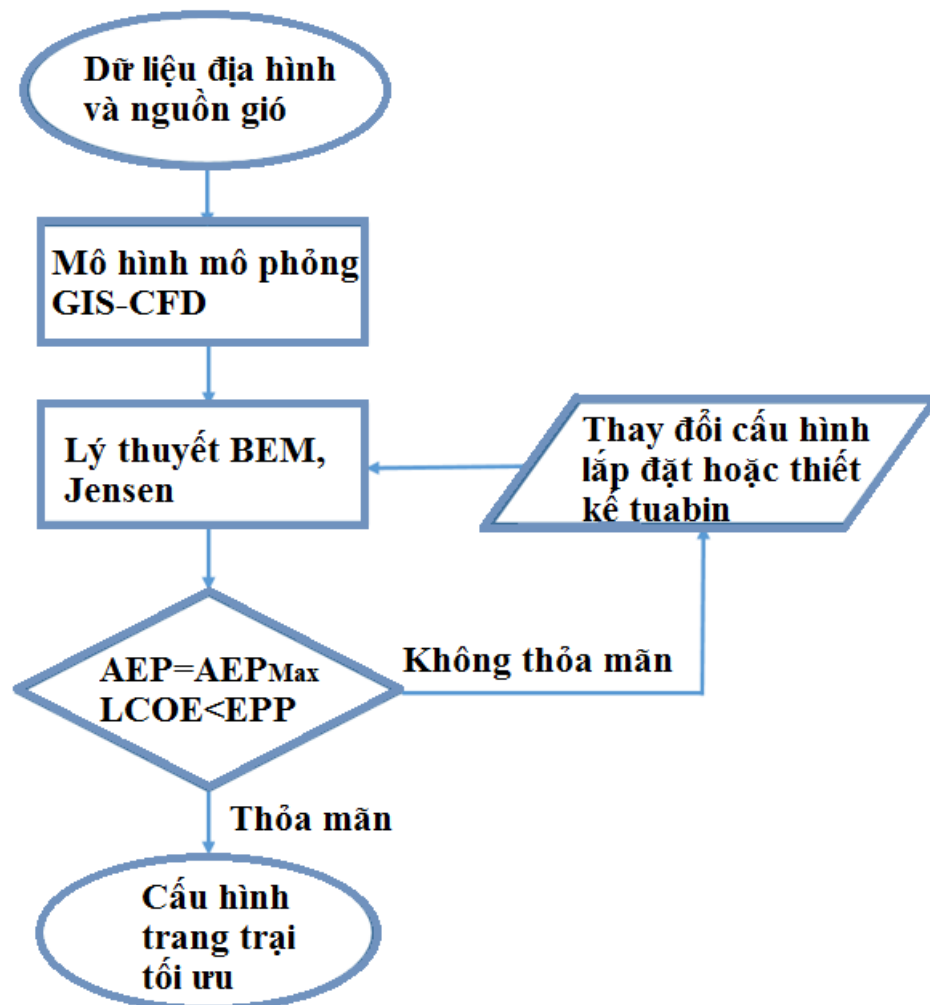
Trong chương này, luận án này trình bày một mô hình thiết kế tối ưu cho cấu hình lắp đặt tuabin trong một trang trại điện gió trên bờ dựa trên sự kết hợp của GIS, mô hình mô phỏng số CFD và lý thuyết BEM, Jensen. Mục tiêu của mô hình tối ưu hóa này là xác định cấu hình lắp đặt của một số tuabin nhất định trong khu vực trang trại có diện tích và địa hình xác định để đạt được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý. Giá trị LCOE hợp lý có nghĩa là nó phải nhỏ hơn giá mua điện từ trang trại điện gió khu vực (EPP) hiện đang áp dụng tại Việt Nam. Sơ đồ của mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin này được thể hiện trong Hình 4.1.

Mô hình thiết kế đề xuất bao gồm năm bước chính:

- Bước 1: Thu thập đặc điểm địa hình, diện tích và tài nguyên gió trong khu vực phát triển trang trại gió. Chi tiết của công việc này đã được mô tả trong phần đầu của Chương III.

- Bước 2: Mô phỏng quá trình tương tác giữa tài nguyên gió với địa hình khu vực trang trại trong các điều kiện khác nhau. Thông qua mô hình phân tích kết hợp GIS - CFD, tổn thất năng lượng gió do các yếu tố địa hình sẽ được xác định. Kết quả thu được là các hàm phân bố tốc độ gió tại các vị trí và độ cao khác

nhau. Từ đó, các loại tuabin và cấu hình lắp đặt dự kiến trong khu vực diện tích trang trại sẽ được xác định. Chi tiết của công việc này cũng đã được mô tả trong phần đầu của Chương III.



Hình 4.1. Sơ đồ của mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin trong một trang trại điện gió trên bờ

- Bước 3: Tổn thất năng lượng gió gây ra bởi các tuabin với các cấu hình lắp đặt khác nhau sẽ được xác định bằng lý thuyết vết thức Jensen. Các cấu hình khác nhau sẽ dựa trên khoảng cách khác nhau giữa các hàng tuabin. Khoảng cách tuabin sẽ có giá trị tăng dần từ nhỏ đến lớn. Sau đó, công suất hoạt động thực tế của các tuabin sẽ được xác định bằng lý thuyết BEM. Mô tả chi tiết về lý thuyết Jensen và BEM đã được trình bày trong Chương II.

- Bước 4: Giá trị AEP và LCOE của các cấu hình lắp đặt tuabin khác nhau sẽ được xác định lần lượt theo các hàm lý thuyết dựa trên dữ liệu tài nguyên gió

sau khi hiệu chỉnh tổn thất năng lượng do các yếu tố địa hình và tuabin gây ra. Ở mỗi cấu hình lắp đặt, các giá trị AEP và LCOE tương ứng sẽ được xác định. Nếu AEP của cấu hình lớn hơn cấu hình trước đó, cấu hình lắp đặt tuabin sẽ tiếp tục được thay đổi. Nếu cấu hình có AEP nhỏ hơn cấu hình trước đó hoặc khoảng cách giữa các hàng tuabin vượt quá chiều rộng của diện tích khu vực trang trại gió, quá trình thay đổi cấu hình sẽ dừng lại. Tại thời điểm này, kiểm tra cấu hình nào cho giá trị AEP lớn nhất và xem xét điều kiện LCOE nhỏ hơn EPP. Trong trường hợp cấu hình đáp ứng được AEP lớn nhất nhưng LCOE lớn hơn EPP, cấu hình có AEP lớn nhất vẫn sẽ được ưu tiên. Bởi vì hàm mục tiêu hướng đến hiệu quả tối đa trong khai thác năng lượng gió.

- Bước 5: Xác định cấu hình lắp đặt tối ưu, là cấu hình đồng thời thỏa mãn cả hai ràng buộc AEP lớn nhất và $LCOE < EPP$. Nếu kết quả phân tích cho thấy LCOE lớn hơn EPP, kết quả này có thể được sử dụng làm cơ sở khoa học để thuyết phục các cơ quan quản lý nhà nước như EVN điều chỉnh giá trị EPP phù hợp hơn.

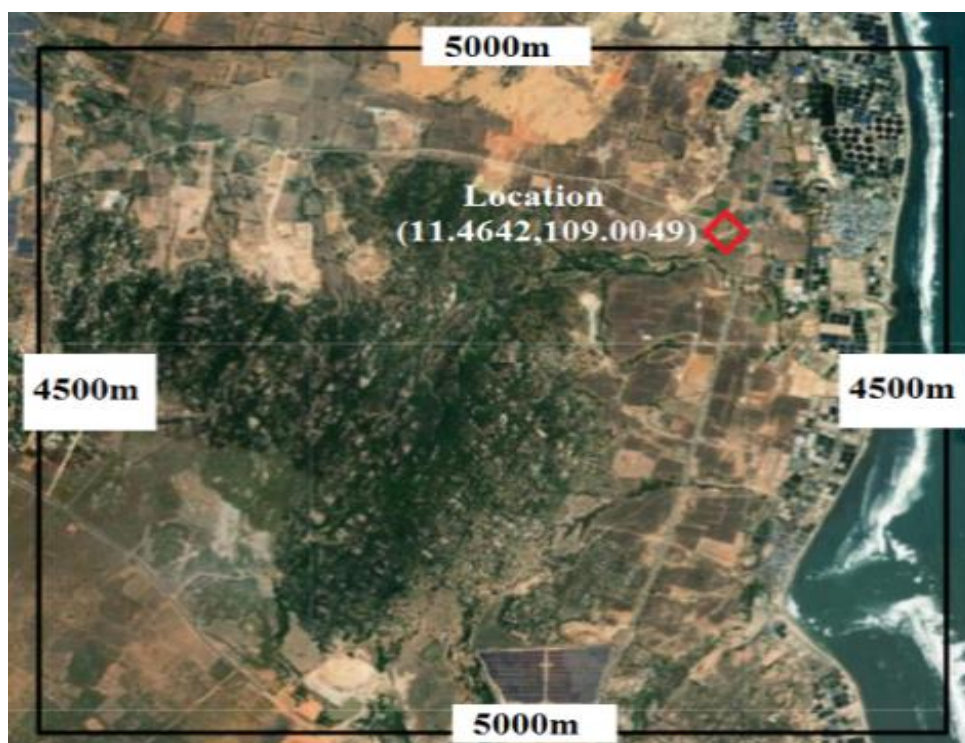
IV.2. Áp dụng mô hình thiết kế cho khu vực trang trại điện gió trên bờ tại tỉnh Khánh Hòa

Mô hình thiết kế cấu hình trang trại điện gió được xây dựng ở phần IV.1 đã được áp dụng cho một khu vực ở tỉnh Khánh Hòa (Ninh Thuận cũ), xung quanh tọa độ (11°27'51.1"N; 109°00'17.6"E). Hiện tại, một trang trại điện gió đang hoạt động ở đây nhưng trang trại điện gió này đã được bán cho một tập đoàn năng lượng nước ngoài. Trang trại này hiện có 16 tuabin gió và một loạt các khu vực khác có kết hợp với các tấm quang điện mặt trời. Để tránh ảnh hưởng của các tấm quang điện đến nguồn gió trong khu vực, luận án này đã loại bỏ khu vực chứa các tấm quang điện, khu vực bị loại bỏ này có 6 tuabin. Khu vực còn lại chứa 10 tuabin ENERCON E103/2350. Các thông số chính của tuabin được thể hiện trong Bảng 4.1 [73], [74].

Bảng 4.1. Các thông số chính của tuabin ENERCON E103/2350

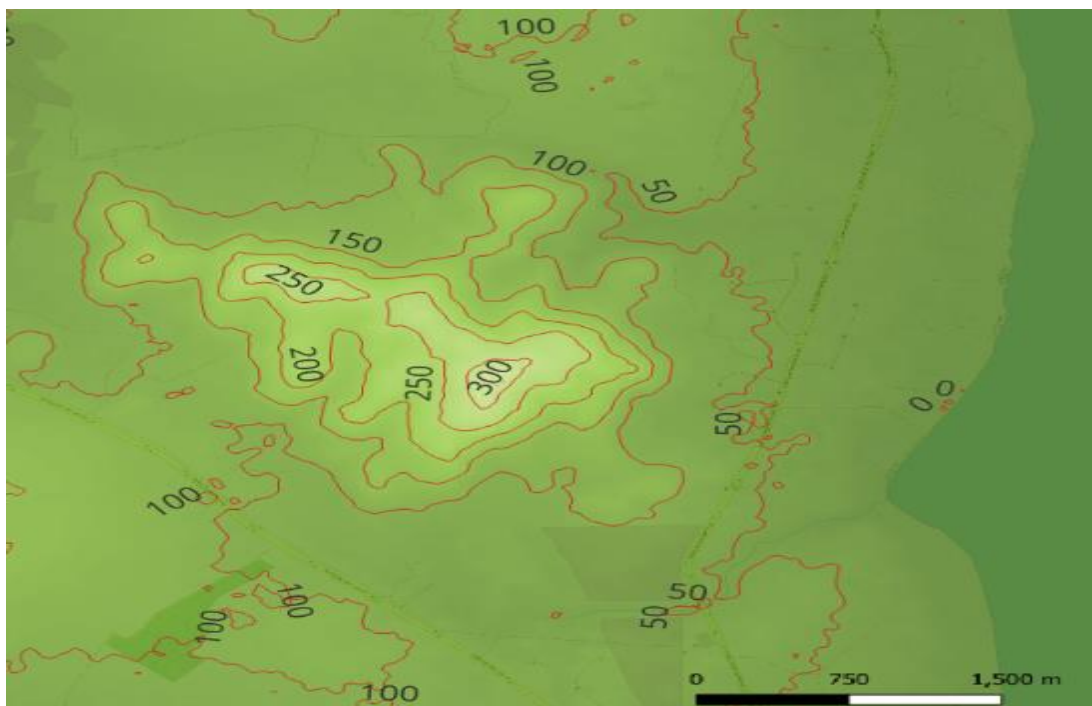
Thông số	Giá trị	Thông số	GIÁ TRỊ
Nhà sản xuất	Enercon	Tốc độ rôtor nhỏ nhất	6 vòng/phút
Tên	E103/2350	Tốc độ rôtor lớn nhất	15 vòng/phút
Đường kính rôto	103 m	Tốc độ gió bắt đầu hoạt động	2,5 m/s
Số cánh quạt	3	Tốc độ gió thiết kế	12,0 m/s
Chiều cao HUB	98m - 138m	Tốc độ gió dừng hoạt động	25,0 m/s
Điều khiển công suất	Pitch	Công suất thiết kế	2350 kW

Luận án sử dụng mô hình thiết kế như thể hiện trong Hình 4.1 để nghiên cứu và đánh giá xem trang trại này đã lựa chọn loại tuabin và cấu hình lắp đặt phù hợp hay chưa, từ đó sẽ đề xuất một cấu hình lắp đặt tối ưu cho khu vực này. Nhiệm vụ đầu tiên là xây dựng bản đồ địa hình và tài nguyên gió trong khu vực xung quanh tọa độ ($11^{\circ}27'51.1''\text{N}$; $109^{\circ}00'17.6''\text{E}$) như trong bước 1 và bước 2. Việc thực hiện hai bước này đã được trình bày chi tiết trong Phần III.1. Khu vực được mô hình hóa có các thông số được thể hiện trong Hình 4.2.



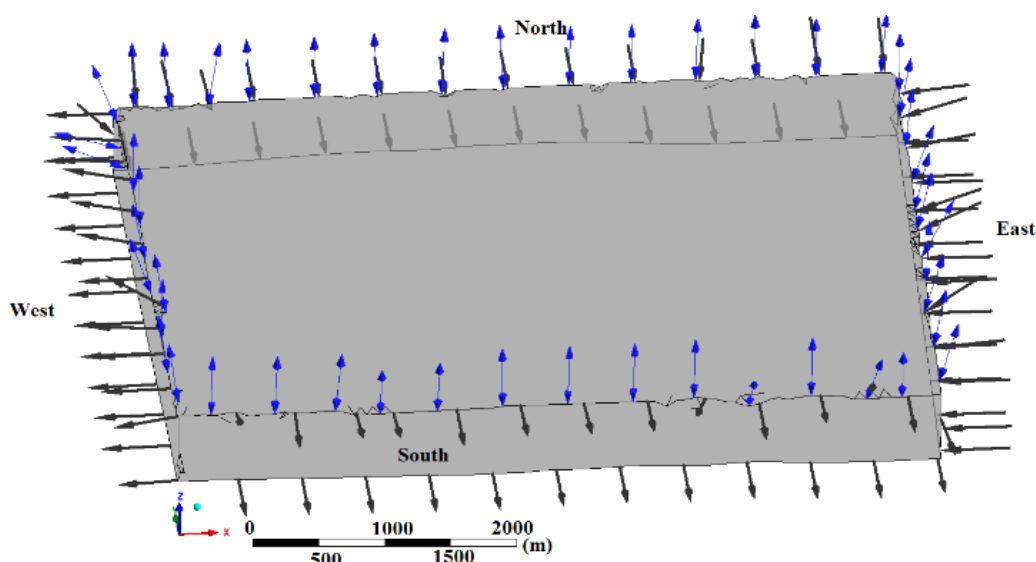
Hình 4.2. Khu vực trang trại điện gió xung quanh tọa độ ($11^{\circ}27'51.1''\text{N}$; $109^{\circ}00'17.6''\text{E}$)

Sự phân bố độ cao địa hình của khu vực này cũng được xác định dựa trên nguồn dữ liệu độ cao địa hình kỹ thuật số DEM (SRTM 30m) được tích hợp trong QGIS như thể hiện trong Hình 4.3.



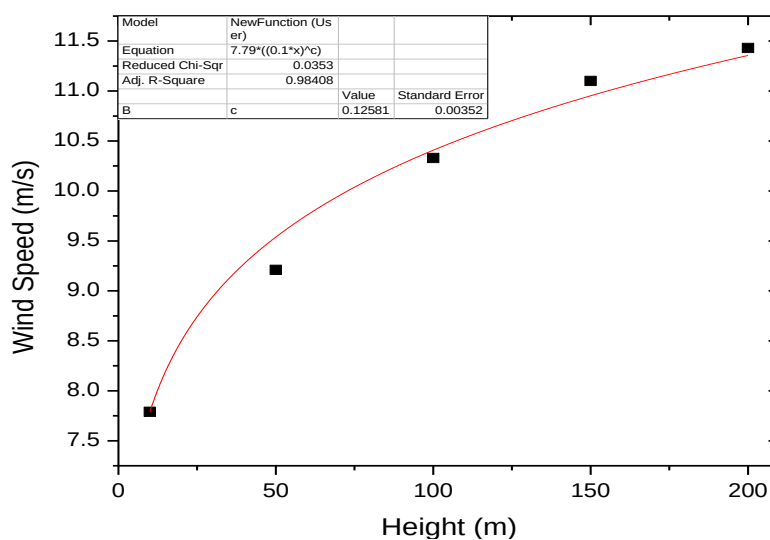
*Hình 4.3. Sự phân bố độ cao địa hình của khu vực xung quanh tọa độ
(11°27'51.1"N; 109°00'17.6"E)*

Từ đây, mô hình phân tích được xây dựng trên phần mềm Ansys CFX (phiên bản dành cho sinh viên) với chiều dài 5.000 m, chiều rộng 4.500 m và độ cao lớp không khí là 500 m so với mực nước biển. Loại lưới được sử dụng là sự kết hợp giữa lưới tứ giác và lưới lục giác. Kích thước lưới lớn nhất là 100 m, tổng số lưới là 166.495 và tổng số nút là 38.618. Sau đó, mô hình được thiết lập với các điều kiện biên như thể hiện trong Hình 4.4. Phần giải thích chi tiết về quá trình xây dựng mô hình, tạo lưới, thiết lập điều kiện biên và điều kiện ban đầu tương tự như trong Phần III.1.



Hình 4.4. Thiết lập điều kiện biên và điều kiện ban đầu cho mô hình CFD

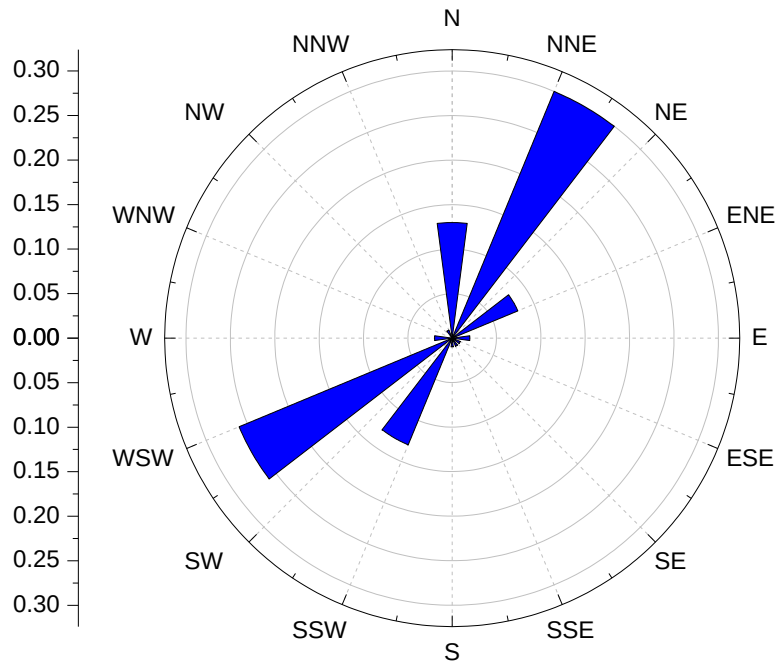
Tốc độ gió trung bình theo độ cao trong khu vực này được xác định dựa trên dữ liệu tài nguyên gió do Ngân hàng Thế giới cung cấp [62]. Hàm phù hợp lý thuyết cho phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao được thể hiện trong Hình 4.5 và phương trình (4.1). Hướng gió và phân bố tần suất tốc độ gió được thể hiện trong Hình 4.6.



Hình 4.5. Hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao tại mặt phẳng lối vào của mô hình CFD

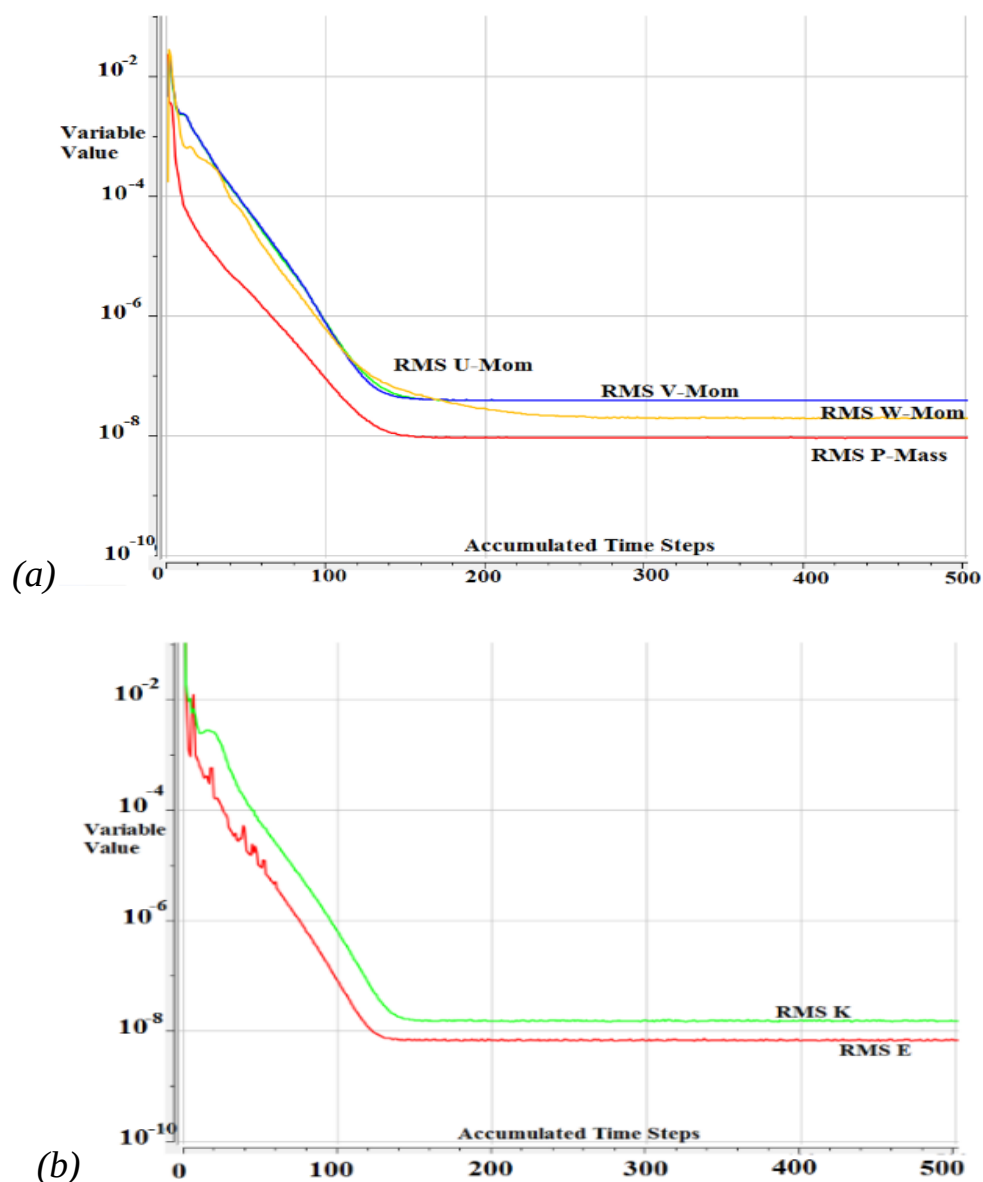
Hàm phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao thu được từ quá trình khớp hàm được xác định như trong phương trình (4.1):

$$WindSpeed = 7.79 \times \left(\frac{h}{10} \right)^{0.13} \quad (4.1)$$



Hình 4.6. Biểu đồ hoa gió tại khu vực trang trại

Phân bố tốc độ gió trung bình theo độ cao tại bề mặt lõi vào và hướng gió tới được đưa vào mô hình phân tích trong Hình 4.4 để thiết lập các điều kiện ban đầu. Hướng gió tới chính được xác định là từ Đông Bắc đến Tây Nam. Hướng gió chính là 60° với trục OX. Điều kiện biên của mô hình phân tích này là bề mặt đất được thiết lập là môi trường rắn, cố định và không khí xung quanh là không gian mở. Mô hình dòng chảy rối được sử dụng trong phân tích này là $k - \varepsilon$. Tiếp theo, mô hình này sẽ được giải bằng phương pháp RANS với tổng cộng 500 lần lặp. Quá trình biến đổi của các đại lượng tham gia vào mô hình mô phỏng được thể hiện trong Hình 4.7.

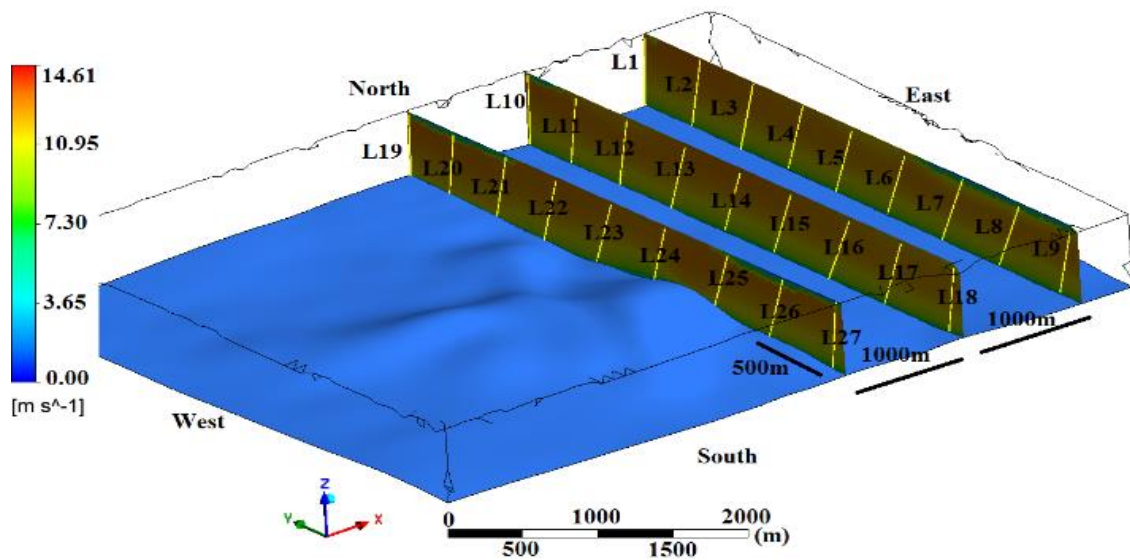


Hình 4.7. Thặng giáng sai số của các đại lượng: tốc độ và động lượng (a); và k và ε (b)

Dữ liệu trong hình 4.7 cho thấy biến thiên sai số của các đại lượng như vận tốc dòng chảy dọc theo các trục OX, OY, OZ, động lượng, vv... đều hội tụ sau khoảng 250 lần lặp. Do đó, kết quả thu được từ mô hình phân tích này đảm bảo độ tin cậy về phương pháp tính toán. Mô hình phân tích này sẽ dùng ghi lại kết quả sau 500 lần lặp.

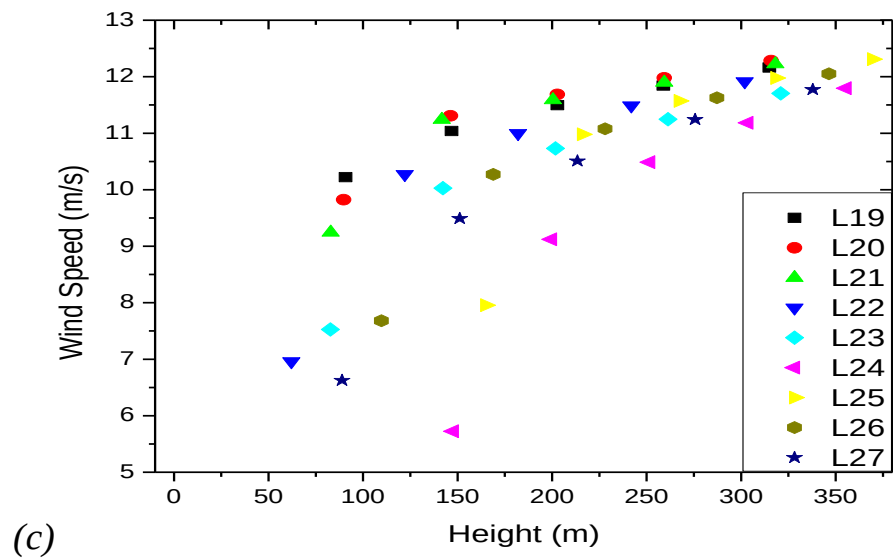
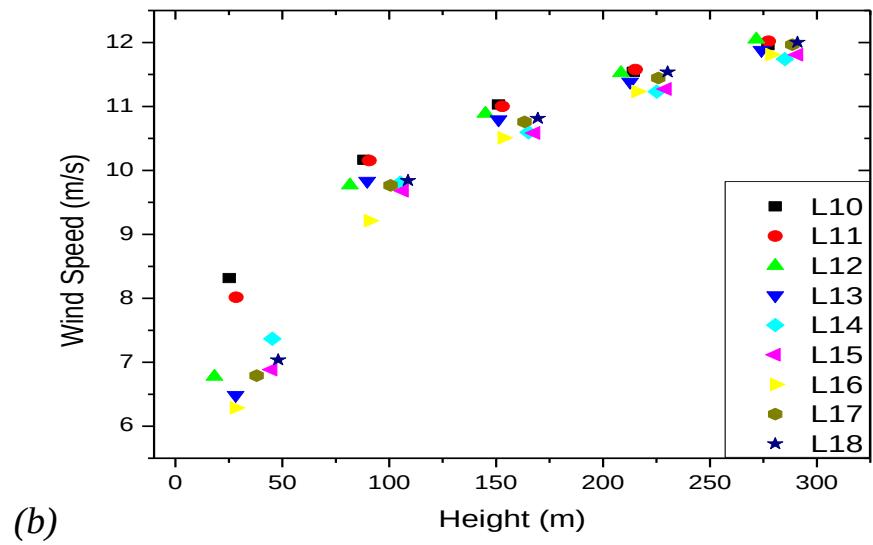
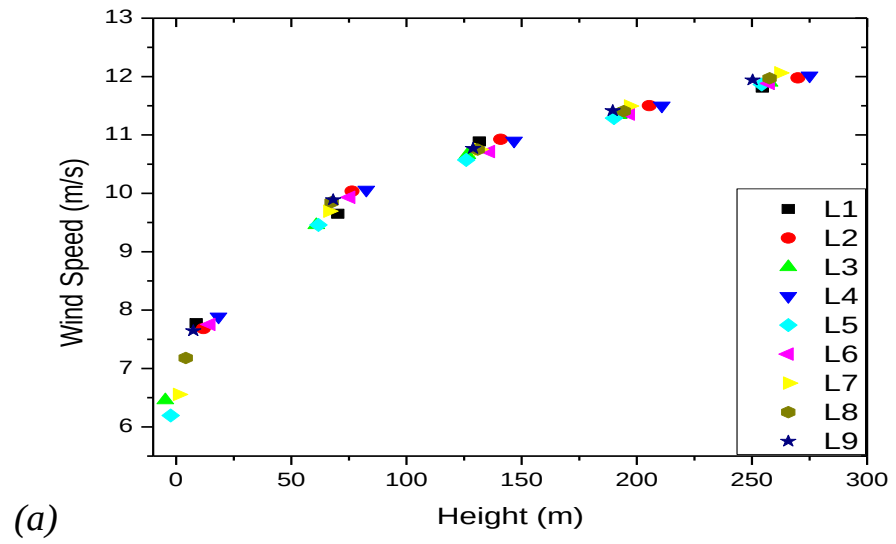
Các kết quả thu được cho thấy các thông số chi tiết về tốc độ gió và hướng gió chính tại tất cả các điểm không gian có trong mô hình. Tuy nhiên, để giảm thiểu dữ liệu, chỉ một vài khu vực tiềm năng sẽ được xử lý, phân tích và đánh giá

thêm. Từ dữ liệu vệ tinh như thể hiện trong Hình 4.2, Hình 4.3, đỉnh núi và khu vực phía Tây có địa hình dốc, cao khoảng 200 m so với mực nước biển. Do đó, việc lắp đặt tuabin gió ở đây rất khó khăn. Khu vực phía Đông có địa hình bằng phẳng, đường sá thuận tiện cho việc vận chuyển và lắp đặt tuabin gió. Vì vậy, khu vực này sẽ được khảo sát chi tiết. Các mặt cắt dọc vuông góc với hướng Đông được xây dựng, mỗi mặt cắt cách nhau 1.000 m. Dọc theo mặt cắt là các đường theo vị trí thẳng đứng, mỗi đường cách nhau 500 m như thể hiện trong Hình 4.8.



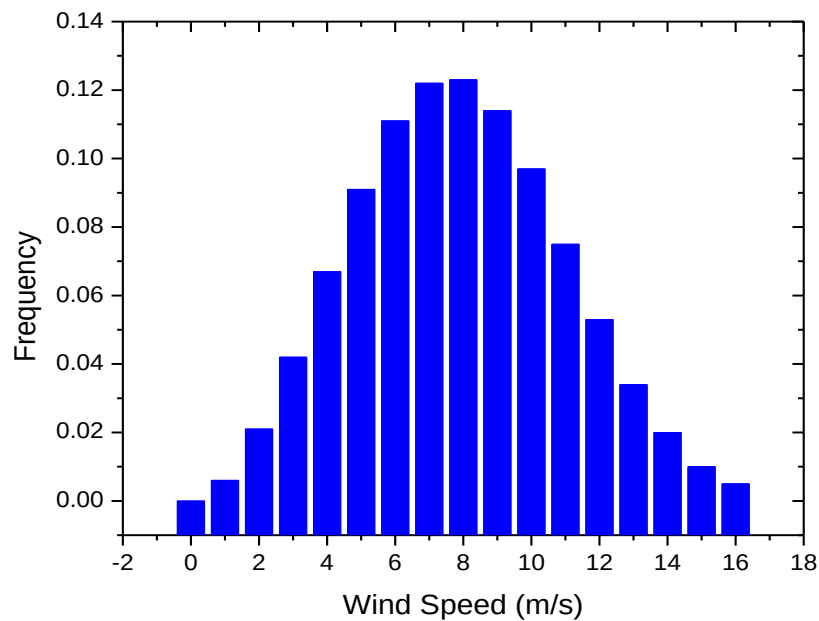
Hình 4.8. Các vị trí được khảo sát chi tiết trong mô hình

Phân bố tốc độ gió theo độ cao khoảng 200 m so với mặt đất của các vị trí được thể hiện trong Hình 4.9. Kết quả cho thấy độ cao địa hình tăng dần từ phía Đông sang phía Tây. Chênh lệch độ cao giữa các mặt cắt ngang là khoảng 30 m. Tốc độ gió ở độ cao khoảng 150 m so với mặt đất cũng tăng dần từ phía Đông sang phía Tây tương ứng. Hình 4.9 (a) cho thấy tốc độ gió này trung bình khoảng 10,5 m/s, Hình 4.9 (b) cho thấy tốc độ gió này trung bình khoảng 11,0 m/s, Hình 4.9 (c) cho thấy tốc độ gió này trung bình khoảng 11,5 m/s. Tốc độ gió trung bình tăng do độ cao địa hình tăng, thể tích không gian giảm theo định luật Bernoulli.



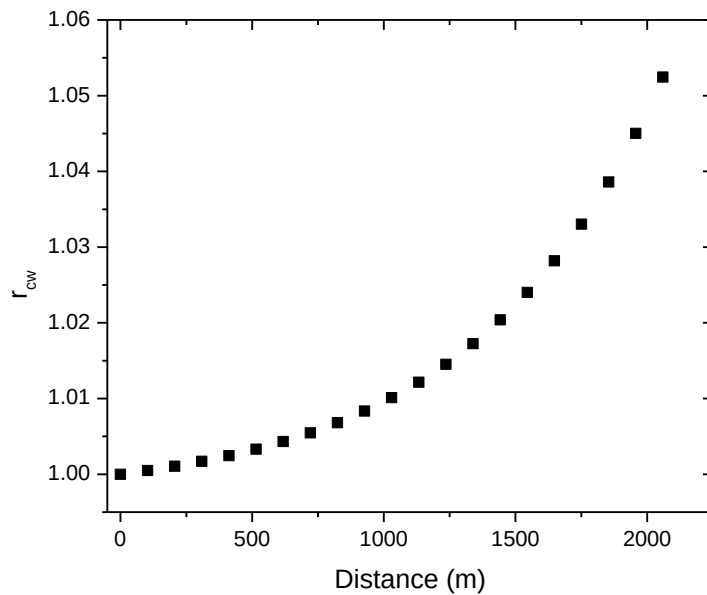
Hình 4.9. Phân bố tốc độ gió theo độ cao tại các vị trí khác nhau

Để so sánh và xác minh dữ liệu tài nguyên gió của Ngân hàng Thế giới, dữ liệu thực nghiệm từ năm 2008 đến năm 2010 trong khu vực này cũng được sử dụng [75], [76]. Các giá trị tốc độ gió và hướng gió chính tương tự như kết quả thu được từ mô hình phân tích với dữ liệu tài nguyên gió của Ngân hàng Thế giới. Hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull trong khu vực này theo hướng gió chính NNE có các tham số $W=2,8$ và $S=8,9$. Các giá trị phân bố tốc độ gió theo hàm Weibull được thể hiện trong Hình 4.10 [77].



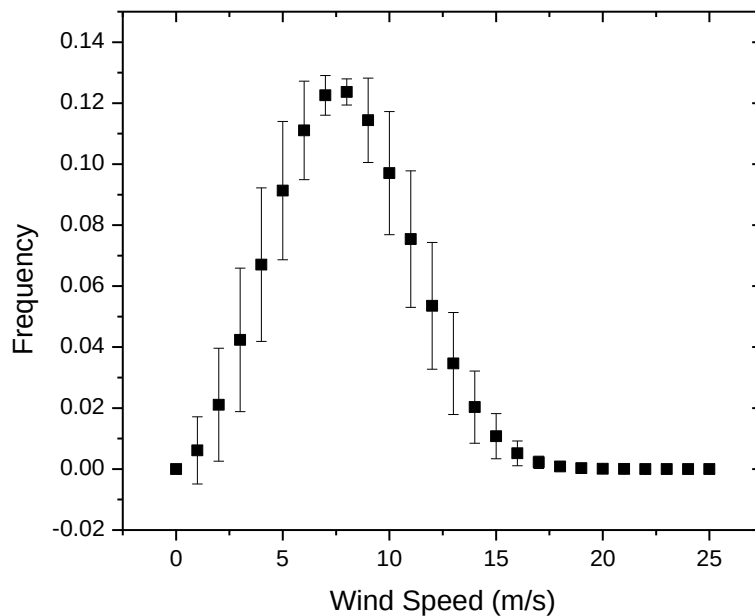
Hình 4.10. Hàm phân bố tốc độ gió Weibull trong khu vực trang trại

Từ các kết quả thu được như trong Hình 4.9, tỉ số thay đổi của tốc độ gió ở độ cao 100 m theo địa hình (r_{cw}) của khu vực này từ phía Đông sang phía Tây được xác định như trong Hình 4.11. Sự thay đổi này là do tác động của các yếu tố địa hình đối với nguồn gió đến. Các giá trị r_{cw} được sử dụng để hiệu chỉnh lại các giá trị tốc độ gió và tần suất tốc độ gió tương ứng tại các vị trí dự định lắp đặt các tuabin khác nhau trong khu vực phân tích.



Hình 4.11. Tỷ số thay đổi vận tốc gió ở độ cao 100 m theo địa hình khu vực trang trại

Sau khi tiến hành hiệu chỉnh giá trị tốc độ gió theo địa hình dựa trên giá trị r_{cw} . Hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull của khu vực này được hiệu chỉnh và biểu diễn như trong Hình 4.12.

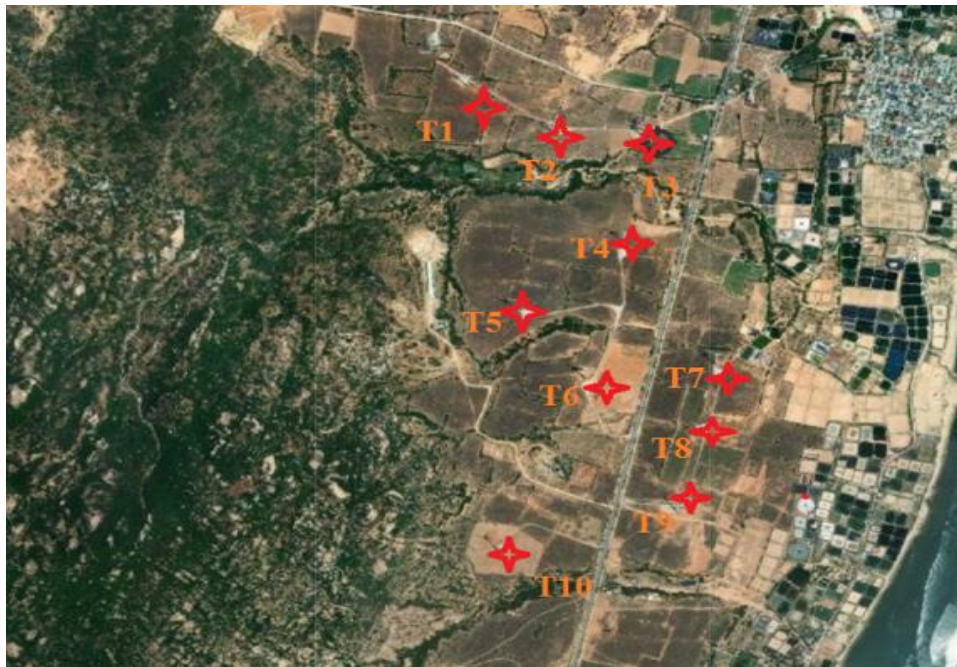


Hình 4.12. Hàm phân bố tần suất tốc độ gió Weibull đã hiệu chỉnh

Các giá trị tốc độ gió và tần suất tốc độ gió sau khi hiệu chỉnh sẽ chứa một số sai số nhất định. Sự đóng góp của các sai số này vào kết quả tính toán AEP được mô tả trong các phương trình (2.34) – (2.36).

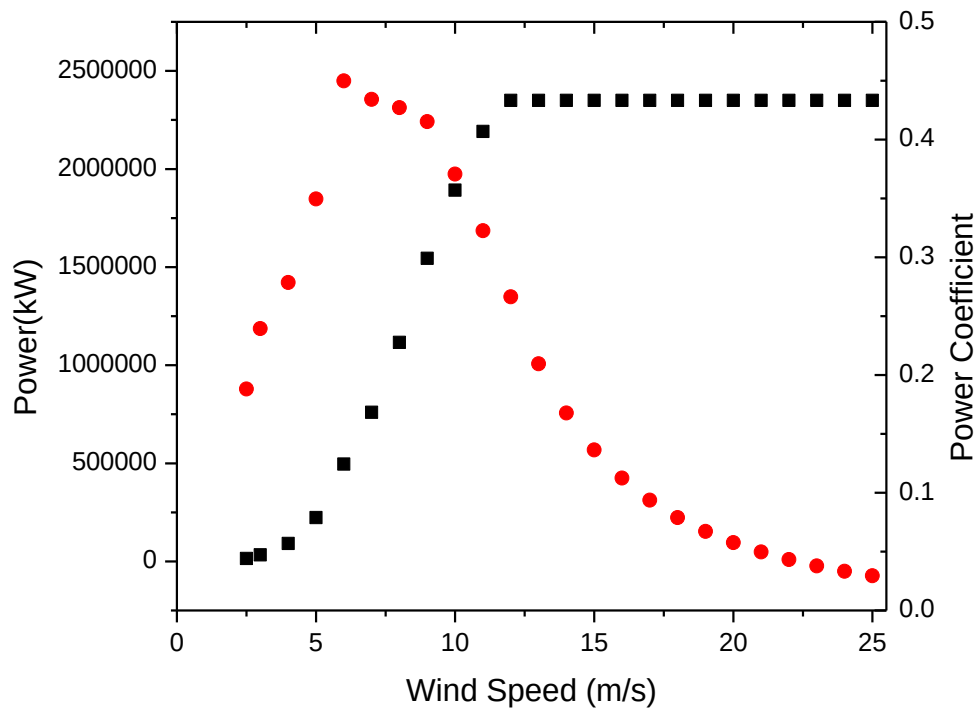
Tốc độ gió tại các điểm trong trang trại này được thể hiện trong Hình 4.9, giá trị tốc độ gió nằm trong khoảng từ 10,5 m/s đến 11,5 m/s ở độ cao 100 m so với mặt đất. Do đó, các tuabin được thiết kế với tốc độ gió định mức trong phạm vi này là phù hợp.

Như đã đề cập ở trên, khu vực này hiện đang được lắp đặt 10 tuabin Enercon E103. Các tuabin này được thiết kế với tốc độ gió định mức là 12,0 m/s. Điều này cho thấy thiết kế tuabin E103 cũng tương đối phù hợp để hoạt động trong khu vực trang trại này. Vị trí của các tuabin này được đánh dấu bằng các ngôi sao màu đỏ như thể hiện trong Hình 4.13.



Hình 4.13. Vị trí của 10 tuabin gió E103 trong khu vực trang trại

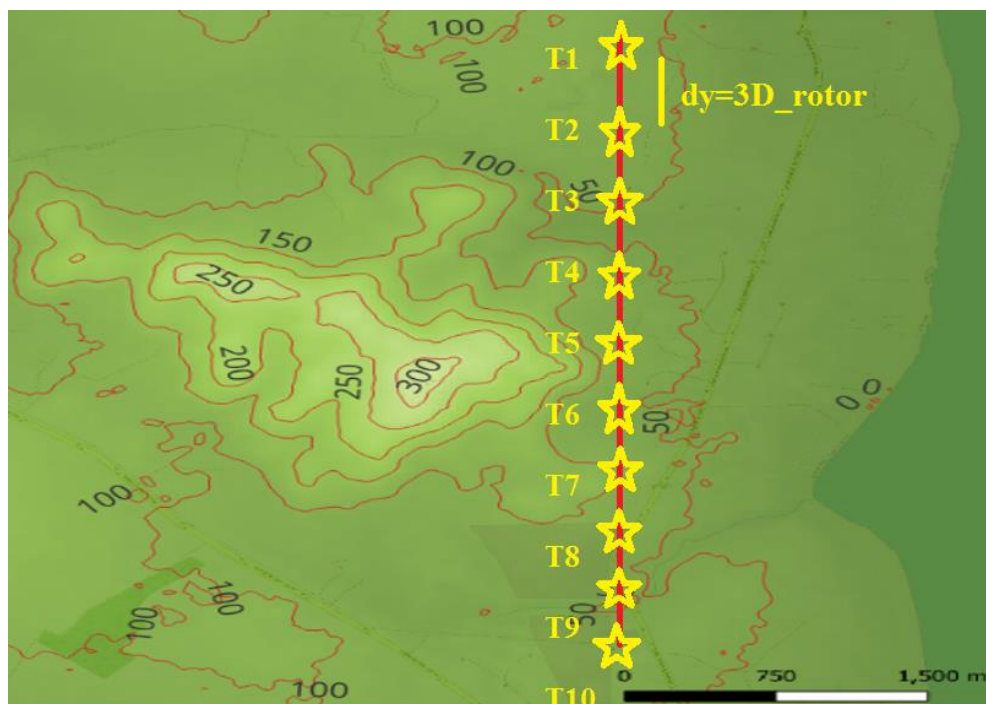
Tuabin E103 là loại tuabin trục ngang 3 cánh với đường kính rôto 103 m và chiều cao tháp lên đến 138 m. Công suất thiết kế lên đến 2.350 kW khi hoạt động ở tốc độ gió 12,0 m/s. Sự phụ thuộc của công suất và hệ số công suất của tuabin E103 vào tốc độ gió được thể hiện trong Hình 4.14.



Hình 4.14. Công suất và hệ số công suất của tuabin E103 theo tốc độ gió

Từ Hình 4.13, 10 tuabin đã được lắp đặt rải rác ở khu vực phía Đông. Khoảng cách giữa các tuabin là khoảng 3Drotor, $d=309$ m. Giá trị AEP, WL của tổng số 10 tuabin này được xác định bằng công thức (2.29) - (2.37), Hình 4.11 và Hình 4.12 là $(99.907.006,4 \pm 25.023.328,2)$ kWh và $WL=0\%$. Theo hướng dẫn trong tiêu chuẩn IEC-61400-12-1 [78] và IEC-61400-12-5 [79], khoảng cách ngang giữa 2 tuabin gần nhất nằm trong khoảng từ 2Drotor đến 4Drotor. Khoảng cách dọc giữa hai tuabin gần nhất nằm trong khoảng từ 2Drotor đến 20Drotor tùy thuộc vào độ phức tạp của địa hình. Do đó, các tuabin E103 được lắp đặt trong trang trại này đáp ứng yêu cầu này.

Tuy nhiên, theo dữ liệu trong Hình 4.3 và Hình 4.9, các tuabin T3, T7, T8, T9 được lắp đặt ở vị trí thấp hơn so với các tuabin còn lại. Chênh lệch độ cao tối đa khoảng 50 m. Điều này cho thấy cấu hình lắp đặt của 10 tuabin này chưa đạt được giá trị AEP tối đa. Theo phương trình (4.1), vị trí càng cao thì tốc độ gió trung bình càng cao. Do đó, tất cả 10 tuabin nên được lắp đặt trong khu vực giữa các đường độ cao đồng mức từ 50 m đến 100 m như thể hiện trong Hình 4.15.

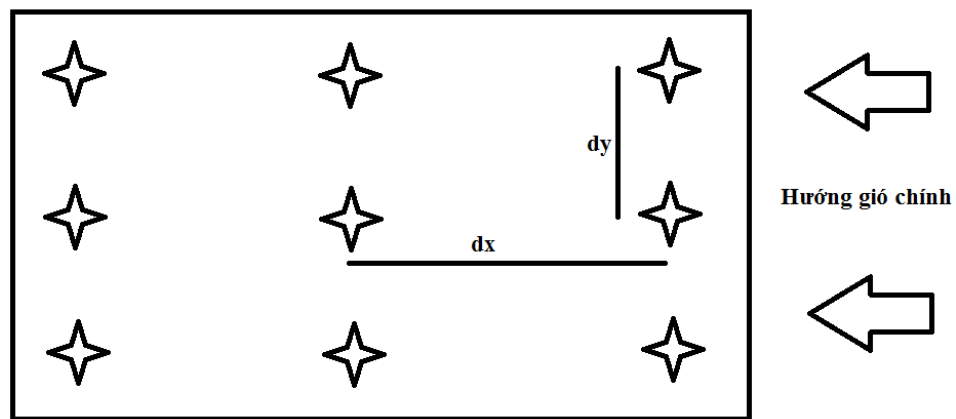


Hình 4.15. Cấu hình lắp đặt được đề xuất của 10 tuabin E103

Nếu 10 tuabin E103 được lắp đặt theo cấu hình đề xuất mới như trong Hình 4.15, nguồn gió cung cấp cho các tuabin sẽ đồng đều hơn và có giá trị trung bình lớn hơn ($r_{cw}=1,05$). Giá trị sản lượng điện hàng năm là $(104.054.042 \pm 26.518.798)$ kWh. Rõ ràng, khi sử dụng cấu hình lắp đặt mới này, giá trị AEP của 10 tuabin E103 sẽ tăng thêm 4.147.035,8 kWh/năm (khoảng 4,2%). Điều này mang lại lợi ích kinh tế cao hơn với sản lượng điện bán ra tăng khoảng 7,6 tỷ VND/năm dựa trên giá mua điện gió khu vực phía Nam năm 2025.

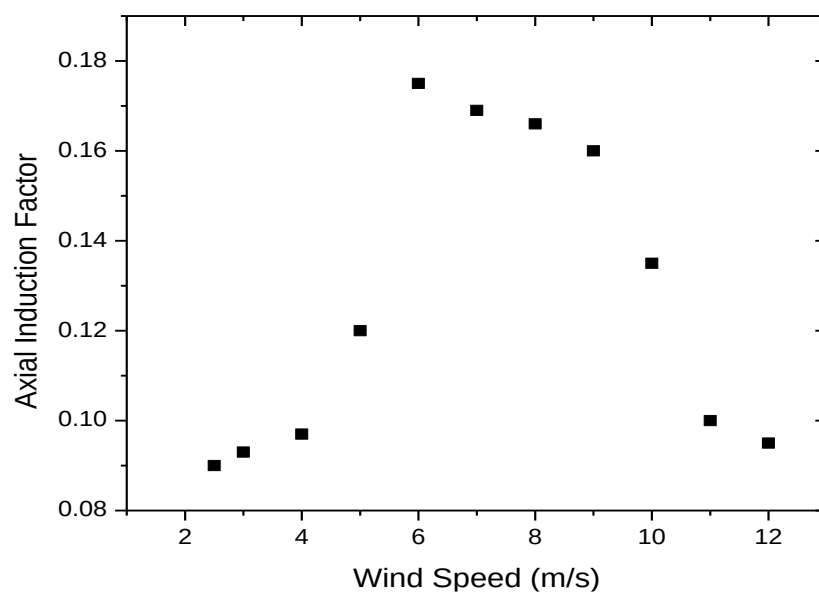
Ngoài ra, vị trí của các tuabin E103 hiện đang không được bố trí theo hàng thẳng, không theo bất kỳ hình dạng tương đối nào. Điều này dẫn đến việc các tuabin hoạt động ở tốc độ gió không đồng đều, gây mất ổn định trong việc điều khiển các thông số công suất đầu ra. Rõ ràng, các tuabin nên được lắp đặt theo hàng ngang vuông góc với hướng Đông để tất cả các tuabin trong một hàng hoạt động ở cùng tốc độ gió. Hơn nữa, diện tích khu vực này còn trống khá nhiều. Để khai thác hiệu quả nguồn tài nguyên gió, cần thiết phải bố trí thêm các tuabin để nâng cao hiệu quả khai thác.

Từ đây, các bước tiếp theo của mô hình thiết kế như thể hiện trong Hình 4.1 sẽ được thực hiện lần lượt để đánh giá và lựa chọn cấu hình lắp đặt tối ưu phù hợp với đặc điểm của khu vực trang trại này. Khoảng cách giữa các tuabin theo phương ngang là khoảng 3 lần đường kính rôto như thực tế hiện nay là phù hợp. Khoảng cách giữa các tuabin theo phương thẳng đứng từ phía Đông sang phía Tây sẽ được thay đổi từ 3 Drotor đến 20 Drotor để tiến hành các khảo sát. Hình 4.16 minh họa cấu hình lắp đặt mới được đề xuất này.



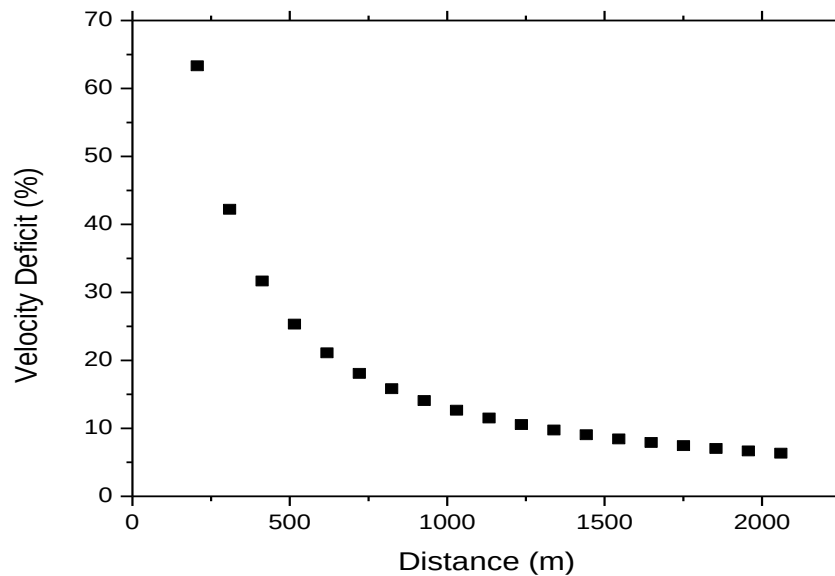
Hình 4.16. Minh họa cấu hình lắp đặt tuabin E103.

Giá trị hệ số cảm ứng hướng trục của tuabin E103 theo tốc độ gió được thể hiện trong Hình 4.17. Khi tuabin E103 này hoạt động ở tốc độ gió khoảng 11,0 m/s trở lên, giá trị của a là 0,1.



Hình 4.17. Hệ số cảm ứng hướng trục của E103 theo tốc độ gió

Tổn thất tốc độ gió theo khoảng cách của các tuabin phía sau được xác định dựa trên lý thuyết vết thức Jensen cho tuabin E103 như thể hiện trong Hình 4.18. Dữ liệu cho thấy tổn thất tốc độ gió thay đổi lớn theo khoảng cách từ 2 Drotor đến 10 Drotor. Từ khoảng cách lớn hơn 10 Drotor (1030 m), tổn thất tốc độ gió biến đổi không đáng kể. Từ đây, khoảng cách tối ưu để lắp đặt các tuabin phía sau là 1030 m. Ở khoảng cách này, tổn thất tốc độ gió là 11,8%. Giá trị này thường được chấp nhận trong thiết kế cấu hình thực tế của các trang trại điện gió trên bờ.



Hình 4.18. Tổn thất tốc độ gió theo khoảng cách của tuabin E103

Theo dữ liệu từ Hình 4.2 và Hình 4.3, khu vực bằng phẳng từ bờ biển đến chân núi có chiều rộng khoảng 2.500 m. Khi loại trừ các khu dân cư, khu vực có thể lắp đặt tuabin gió rộng khoảng 2.000 m và dài khoảng 4.000 m. Đây chính là phần diện tích cố định được sử dụng để thiết kế cấu hình trang trại. Các cấu hình có thể lắp đặt tuabin như sau: Nếu khoảng cách giữa các hàng tuabin là 3 Drotor, có thể lắp đặt 6 hàng; nếu khoảng cách là 4 Drotor, có thể lắp đặt 4 hàng; nếu khoảng cách từ 5 Drotor đến 6 Drotor, có thể lắp đặt 3 hàng; nếu khoảng cách từ 7 Drotor đến 10 Drotor, có thể lắp đặt 2,5 hàng; nếu khoảng cách từ 11 Drotor đến 19 Drotor, có thể lắp đặt 2 hàng; nếu khoảng cách trên 20 Drotor, có thể lắp đặt 1 hàng. Tất cả sẽ có 6 cấu hình trang trại khác nhau được khảo sát trên phạm vi diện tích trang trại này. Các cấu hình này được tính toán cụ thể như sau:

- Cấu hình 1: Cấu hình lắp đặt với khoảng cách hàng là 3Drotor, khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhất là 309 m, tổng số tuabin là 72. Khi đó, tốc độ gió ở mỗi hàng tuabin phía sau sẽ giảm tương ứng 42,2% như thể hiện trong Hình 4.18. Điều này khiến các tuabin ở hàng thứ 4 có tốc độ gió dưới mức vận hành, chỉ có 3 hàng đầu tiên có thể hoạt động. Tổng Tổng sản lượng điện hàng năm là (152.778.722,7 $\pm$ 41.745.155,8) kWh và tổn thất năng lượng là 78,8%.

- Cấu hình 2: Cấu hình lắp đặt với khoảng cách hàng là 4Drotor, khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhất là 412 m, tổng số tuabin là 48. Khi đó, tốc độ gió ở mỗi hàng tuabin phía sau sẽ giảm tương ứng 31,7% như thể hiện trong Hình 4.18. Tổng Tổng sản lượng điện hàng năm là (184.596.510,4 $\pm$ 51.939.780,0) kWh và tổn thất năng lượng là 61,5%.

- Cấu hình 3: Cấu hình lắp đặt với khoảng cách hàng là 6Drotor, khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhất là 618 m, tổng số tuabin là 36. Khi đó, tốc độ gió ở mỗi hàng tuabin phía sau sẽ giảm tương ứng 21,1% như thể hiện trong Hình 4.18. Tổng sản lượng điện hàng năm là (230.843.859,7 $\pm$ 64.878.160,2) kWh và tổn thất năng lượng là 35,8%.

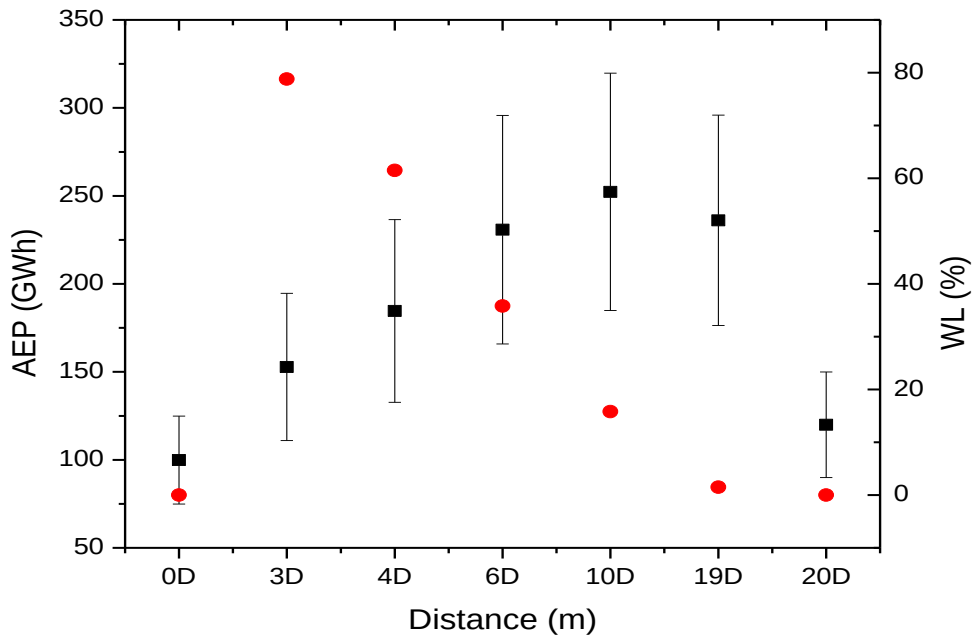
- Cấu hình 4: Cấu hình lắp đặt với khoảng cách hàng là 10Drotor, khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhất là 1.030 m, tổng số tuabin là 30. Khi đó, tốc độ gió ở mỗi hàng tuabin phía sau sẽ giảm tương ứng 12,7% như thể hiện trong Hình 4.18. Tổng sản lượng điện hàng năm là (230.843.859,7 $\pm$ 64.878.160,2) kWh và tổn thất năng lượng gió là 15,8%.

- Cấu hình 5: Cấu hình lắp đặt với khoảng cách hàng là 19Drotor, khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhất là 1.957 m, tổng số tuabin là 24. Khi đó, tốc độ gió ở mỗi hàng tuabin phía sau sẽ giảm tương ứng 6,7% như thể hiện trong Hình 4.18. Tổng sản lượng điện hàng năm là (236.118.269,7 $\pm$ 59.766.995,9) kWh và tổn thất năng lượng gió là 1,5%.

- Cấu hình 6: Cấu hình lắp đặt với khoảng cách hàng là 20Drotor, khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhất là 2.060 m, tổng số tuabin là 12. Khi đó, tốc

độ gió ở mỗi hàng tuabin phía sau sẽ giảm tương ứng 6,3% như thể hiện trong Hình 4.18. Tổng sản lượng điện hàng năm là $(119.888.407,7 \pm 30.027.993,8)$ kWh và không có tổn thất gió do tuabin phía trước trong trường hợp này.

Tổng hợp các kết quả này được thể hiện như trong Hình 4.19.



Hình 4.19. Thay đổi của AEP và WL theo các cấu hình lắp đặt khác nhau

So sánh kết quả thu được từ 6 cấu hình lắp đặt khác nhau như thể hiện trong Hình 4.19, cấu hình thứ 4 với khoảng cách hàng tuabin là 10D rotor cho giá trị AEP lớn nhất và tổn thất do dòng xoáy chỉ 15,8%. Đây là cấu hình tối ưu nhất cho các tuabin E103 được lắp đặt tại trang trại gió này. Hàng thứ 3 của cấu hình này có một nửa đi qua vùng chân đồi có địa hình cao, vì vậy không thể lắp đặt tuabin ở đây. Hình 4.20 minh họa cấu hình lắp đặt của các tuabin E103 trong khu vực khảo sát theo khoảng cách 10D rotor. Vị trí lắp đặt của các tuabin được thể hiện bằng các ngôi sao màu vàng.



Hình 4.20. Cấu hình lắp đặt các tuabin E103 tối ưu tại trang trại

Nếu các tuabin E103 được lắp đặt tại các vị trí được đánh dấu bằng các ngôi sao màu vàng trong Hình 4.20, công suất của các tuabin sẽ đồng đều hơn. Điều này giúp giải quyết các vấn đề về điều khiển và chất lượng điện năng đầu ra. Ngoài ra, tổng số tuabin có thể lắp đặt trong khu vực này là 30, gấp 3 lần so với số lượng hiện tại. Sản lượng điện hàng năm của cấu hình tối ưu có thể lớn hơn khoảng 2,5 lần so với cấu hình hiện tại. Điều này giúp khai thác tối đa nguồn tài nguyên tại khu vực trang trại này.

Dựa trên góc độ vận hành hệ thống điện, các trang trại điện gió tác động đến lưới điện quốc gia bằng cách gây ra sự dao động điện áp và tần số do tính chất thay đổi và không liên tục của gió. Điều này có thể ảnh hưởng đến chất lượng và sự ổn định của điện năng, đặc biệt là ở mức độ thâm nhập cao. Cấu hình tối ưu của các trang trại điện gió sẽ giúp đạt được sản lượng điện đồng đều hơn từ các tuabin. Tuy nhiên, bản chất của tài nguyên gió là không liên tục. Do đó, các trang trại điện gió vẫn gây ra một số vấn đề cụ thể như sau:

- Tính không liên tục và dao động: Sản lượng điện gió dao động dựa trên tốc độ gió, có thể gây ra những thay đổi đột ngột trong sản lượng điện. Điều này gây khó khăn cho việc cân bằng cung và cầu trong thời gian thực.

- Vấn đề chất lượng điện năng: Tốc độ gió thay đổi có thể gây ra dao động điện áp và sóng hài, ảnh hưởng đến chất lượng điện năng.

- Giảm quán tính lưới điện: Các tuabin gió hiện đại được kết nối thông qua bộ biến tần, không có quán tính vật lý của máy phát điện đồng bộ truyền thống. Điều này làm giảm quán tính tổng thể của lưới điện, khiến khả năng chống chịu với các nhiễu loạn đột ngột giảm xuống và làm tăng nguy cơ sụt giảm tần số.

- Thách thức về ổn định lưới điện: Mức độ thâm nhập cao có thể dẫn đến các vấn đề về ổn định, chẳng hạn như dao động điện năng, có thể cần thêm các hệ thống điều khiển để quản lý.

- Nhu cầu về cơ sở hạ tầng: Nhiều khu vực có tốc độ gió cao nằm ở vùng sâu vùng xa, đòi hỏi phải xây dựng các đường dây truyền tải mới để vận chuyển điện đến các trung tâm dân cư.

Tuy nhiên, nếu các trang trại điện gió được thiết kế tối ưu cũng có thể mang lại những tác động tích cực, chẳng hạn như:

- Hỗ trợ điện áp: Các trang trại điện gió, đặc biệt là những trang trại có hệ thống điều khiển công suất phản kháng như STATCOM, có thể hỗ trợ và ổn định điện áp, đặc biệt là ở những khu vực có chất lượng điện áp kém ở cuối các đường dây dài và yếu.

- Quản lý lưới điện được cải thiện: Việc đa dạng hóa địa lý các trang trại điện gió có thể giúp làm giảm sự dao động sản lượng điện.

- Công nghệ tuabin hiện đại: Các tuabin mới được thiết kế với hệ thống điều khiển tiên tiến để giúp duy trì sự ổn định và khắc phục các sự cố mà không cần ngắt kết nối khỏi lưới điện.

- Công nghệ điều khiển: Các công nghệ điều khiển mới và việc tích hợp các hệ thống lưu trữ năng lượng đang được phát triển để giúp các tuabin gió hiện đại cung cấp các dịch vụ lưới điện như đáp ứng tần số và quán tính tổng hợp.

Ngoài ra, để tăng tính khả thi của cấu hình lắp đặt tối ưu này, luận án tiếp tục tính toán giá trị LCOE của các cấu hình lắp đặt được đề xuất theo phương trình (2.38). Giá trị LCOE được xác định dựa trên bốn đại lượng chính: CapEx, OpEx, rd và AEP. CapEx bao gồm tất cả các chi phí đầu tư ban đầu như chi phí mua tuabin, vận chuyển, lắp đặt, thuê đất, chi phí quản lý dự án, vv...; OpEx bao gồm các chi phí liên quan đến vận hành, bảo trì và sửa chữa tuabin trong suốt vòng đời hoạt động của chúng. Tỷ lệ chiết khấu, rd, là lãi suất được sử dụng để chiết khấu dòng tiền vào và ra khỏi dự án; AEP là sản lượng điện hàng năm của trang trại gió.

- Theo IRENA [80], tổng chi phí lắp đặt điện gió trung bình toàn cầu đã giảm khoảng 12% mỗi năm trong giai đoạn 2010-2024. CapEx trung bình toàn cầu là 1.041 \$/kW vào năm 2024. CapEx của thị trường Việt Nam là khoảng 1.500 \$/kW vào năm 2024. Điều này là do các tuabin phải được nhập khẩu hoàn toàn, chủ yếu từ các nhà cung cấp châu Âu. Dẫn đến chi phí quản lý dự án và vận chuyển cao hơn. Nhìn chung, giá trị CapEx trung bình trên thế giới tương đối ổn định. Điều này cũng giúp giá trị CapEx của thị trường Việt Nam duy trì xu hướng giảm ổn định. Sự giảm giá trị CapEx chủ yếu là do mở rộng quy mô sản xuất và cải thiện hệ số công suất của tuabin.

- Chi phí vận hành và bảo trì đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì hiệu suất, độ tin cậy và hiệu quả lâu dài của các dự án điện gió. Khi việc triển khai điện gió mở rộng trên toàn cầu và các kỹ thuật vận hành và bảo trì trở nên tinh vi hơn, dựa trên dữ liệu và tối ưu hóa chi phí, điều này đã dẫn đến sự sụt giảm đáng kể giá trị chi phí vận hành trong giai đoạn 2010-2024. Ngoài ra, OpEx cũng chịu ảnh hưởng bởi một số yếu tố thay đổi như bảo hiểm, giá thuê đất và các ưu đãi thuế từ các quốc gia. Đối với Việt Nam, Chính phủ luôn khẳng định các chính sách

miễn thuế và giảm giá thuê đất cho các dự án năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện gió. Rõ ràng, OpEx sẽ duy trì giá trị ổn định trong vài thập kỷ tới.

- Hiện nay, các dự án điện gió tại Việt Nam chủ yếu do các tập đoàn nước ngoài lớn thực hiện. Dòng tiền đầu tư tương đối ổn định. Bên cạnh đó, thị trường Việt Nam cũng là một thị trường ổn định. Do đó, những thay đổi trong tỉ lệ chiết khấu của các dự án điện gió là không đáng kể, với rất ít tác động đến LCOE. Cũng theo IRENA, giá trị LCOE trung bình toàn cầu cho các dự án điện gió trên bờ đã giảm 3% mỗi năm trong giai đoạn 2010 – 2024. Giá trị LCOE dao động từ 24,0 \$/MWh đến 75,0 \$/MWh vào năm 2024.

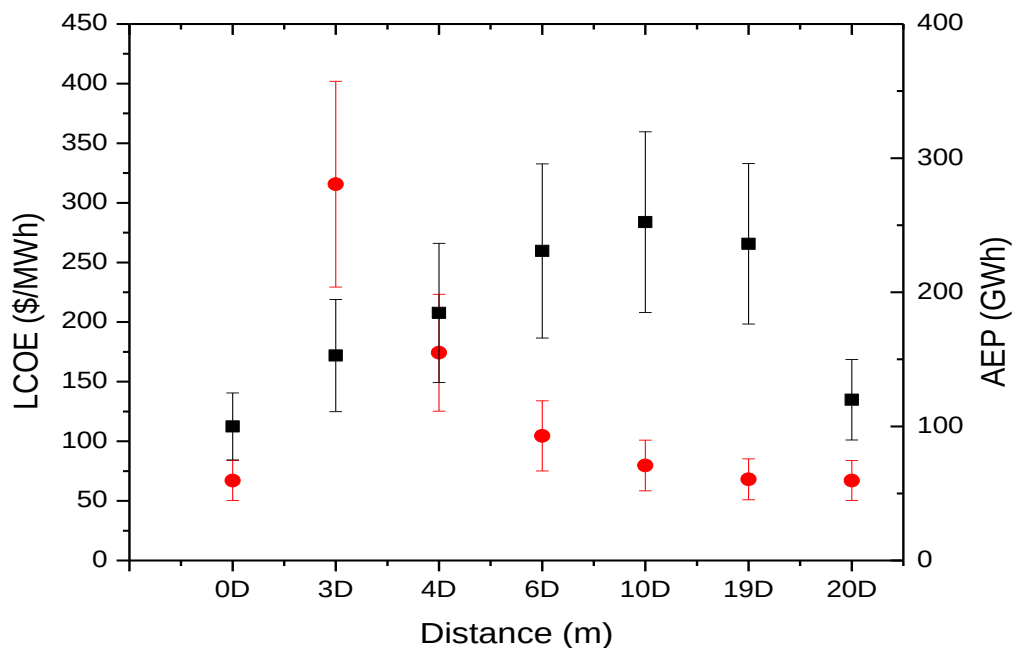
Việc tính toán chi tiết LCOE không phải là mục tiêu nghiên cứu chính của luận án này. LCOE chỉ được sử dụng như một giá trị thể hiện sự phù hợp với giá mua điện thực tế hiện đang được áp dụng tại Việt Nam. Do đó, dựa trên các số liệu đã công bố cho một tuabin tương đương (2,6 MW) như trong tài liệu tham khảo [60] và [61]. Tại thời điểm trang trại này bắt đầu vận hành năm 2019, CapEx được xác định dựa trên ba đại lượng chính: chi phí vốn của tuabin (991 \$/kW), cân bằng hệ thống (326 \$/kW), chi phí tài chính (120 \$/kW). Từ đó, CapEx được xác định là 1.436 \$/kW. Chi phí vận hành của tuabin trên bờ này phụ thuộc vào chính sách của từng quốc gia, giá trị OpEx thường nằm trong khoảng từ 32 \$/kW/năm đến 54 \$/kW/năm. Trong luận án này, giá trị OpEx được xác định là 43 \$/kW/năm. Tỉ lệ chiết khấu phụ thuộc vào thị trường, chính sách và vốn của nhà đầu tư. Trong tính toán này, rd được chọn là 14,6% và thời gian vận hành là 20 năm [80]. Các kết quả tính toán được thể hiện trong Bảng 4.2 và Hình 4.21.

Bảng 4.2. Giá trị WL, AEP và LCOE theo các cấu hình lắp đặt tuabin khác nhau trong trang trại

Cấu hình	WL (%)	AEP (GWh/năm)	LCOE (\$/MWh)
Thực tế	0	99,9 ± 25,0	67,1 ± 16,8
3Drotor	78,8	152,8 ± 41,8	315,7 ± 86,3

Cấu hình	WL (%)	AEP (GWh/năm)	LCOE (\$/MWh)
4Drotor	61,5	184,6 ± 51,9	174,3 ± 49,0
6Drotor	35,8	230,8 ± 64,9	104,5 ± 29,4
10Drotor	15,8	252,3 ± 67,4	79,7 ± 21,3
19Drotor	1,5	236,1 ± 59,8	68,1 ± 17,2
20Drotor	0,0	119,9 ± 30,0	67,1 ± 16,8

Từ dữ liệu được hiển thị trong Hình 4.21, giá trị LCOE của cấu hình lắp đặt tối ưu là 79,7 \$/MWh, cấu hình lắp đặt thực tế là 67,1 \$/MWh. Hai giá trị này xấp xỉ bằng nhau và hoàn toàn có thể chấp nhận được theo giá mua điện từ các dự án điện gió ở Việt Nam, EPP=79,5 \$/MWh vào năm 2025 [7]. Điều này một lần nữa khẳng định rằng cấu hình thứ 4 là cấu hình lắp đặt tối ưu cho khu vực trang trại gió này.



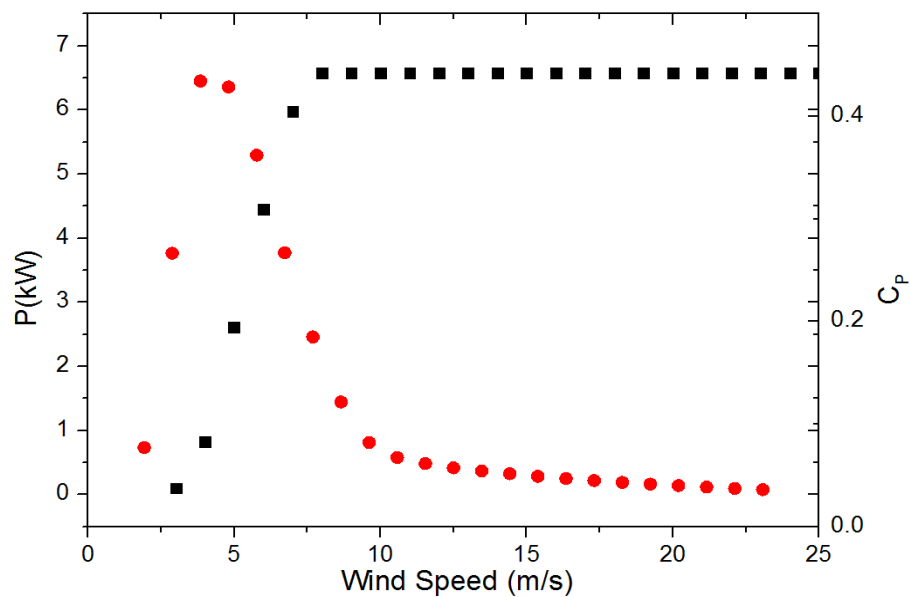
Hình 4.21. Sự thay đổi của LCOE và AEP theo các cấu hình lắp đặt

Tóm lại, nếu các tuabin E103 được lắp đặt tại các vị trí được đánh dấu bằng các ngôi sao màu vàng trong Hình 4.20, công suất điện đầu ra của các tuabin sẽ đồng đều hơn. Điều này giúp kiểm soát và cải thiện chất lượng điện năng đầu ra. Ngoài ra, tổng số tuabin có thể lắp đặt trong khu vực này là 30, gấp 3 lần số lượng

thực tế. Sản lượng điện hàng năm của cấu hình lắp đặt tối ưu có thể lớn hơn khoảng 2,5 lần so với cấu hình hiện tại. Bên cạnh đó, giá trị LCOE cũng phù hợp với giá mua bán điện đang áp dụng năm 2025.

Phần trên, các tuabin E103 đã được khẳng định là phù hợp với nguồn gió tại khu vực trang trại này. Khu vực này được biết đến là địa điểm có tốc độ gió trung bình cao nhất tại Việt Nam. Tuy nhiên, khi xem xét thêm vấn đề thay đổi thiết kế tuabin, giả sử thay tuabin E103 bằng tuabin gió nhỏ sử dụng mô hình VAST-EPU-S1223 như đã thiết kế trong Chương III. Đường kính cánh quạt của tuabin VAST-EPU-S1223 là 10,0 m. Công suất định mức của tuabin này là 6,57 kW khi hoạt động ở tốc độ gió định mức 8,0 m/s. Tốc độ gió định mức này phù hợp với tốc độ gió trung bình tại khu vực trang trại này. Các tuabin VAST-EPU-S1223 cũng sẽ được lắp đặt theo cấu hình tối ưu như đối với các tuabin E103. Dựa trên diện tích trang trại và đường kính cánh quạt, trang trại này có thể lắp đặt 25 hàng tuabin, mỗi hàng sẽ có 130 tuabin. Sự thay đổi về công suất và hệ số công suất của tuabin VAST-EPU-S1223 theo tốc độ gió được thể hiện trong Hình 4.22.

Thực hiện các bước tính toán tương tự như đối với tuabin E103, giá trị AEP thu được từ các hàng tuabin VAST-EPU-S1223 được trình bày trong Bảng 4.3.



Hình 4.22. Công suất và hệ số công suất của tuabin VAST-EPU-S1223 theo tốc độ gió

Bảng 4.3. Giá trị AEP thu được từ các tuabin VAST-EPU-S1223

Hàng	AEP (kWh)	Hàng	AEP (kWh)
1	$5.763.044,0 \pm 1.154.155,4$	9	$266.537,3 \pm 103.308,2$
2	$4.621.008,9 \pm 1.036.440,1$	10	$155.582,9 \pm 67.246,6$
3	$3.582.920,6 \pm 902.152,7$	11	$85.362,7 \pm 41.528,2$
4	$2.654.905,2 \pm 739.043,1$	12	$30.188,7 \pm 18.757,5$
5	$1.754.776,5 \pm 515.870,3$	13	$13.053,4 \pm 9.144,9$
6	$1.191.269,9 \pm 354.379,8$	14	$2.686,6 \pm 2.363,9$
7	$752.238,9 \pm 231.674,5$	15	$362,6 \pm 393,2$
8	$455.214,8 \pm 154.076,1$	16	≈ 0

Khi các tuabin VAST-EPU-S1223 được lắp đặt với khoảng cách mỗi hàng là 10Drotor theo hướng gió chính, chỉ có 15 hàng tuabin đầu tiên nhận đủ năng lượng gió để hoạt động. Tốc độ gió từ hàng tuabin thứ 16 trở đi có giá trị nhỏ hơn 3,0 m/s, do đó các tuabin này không thể hoạt động. Giá trị AEP trung bình của cấu hình này là 21.329.153,2 kWh. Giá trị này chỉ bằng 21,3% so với cấu hình thực tế và chỉ bằng 9,2% so với cấu hình sử dụng tuabin E103 mới được đề xuất. Điều này cho thấy rằng các tuabin được thiết kế tối ưu cho tốc độ gió từ 4,0 m/s đến 6,0 m/s sẽ không hoạt động hiệu quả khi tốc độ gió từ 8,0 m/s trở lên.

Tóm lại:

Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt trang trại gió được đề xuất trong luận án này có thể xác định ảnh hưởng của các yếu tố địa hình, tài nguyên gió, loại tuabin và cấu hình lắp đặt tuabin trong khu vực phát triển trang trại gió đến giá trị AEP. Mục tiêu của mô hình thiết kế này là xác định cấu hình lắp đặt tuabin trong trang trại có địa hình và diện tích xác định để đạt được giá trị AEP lớn nhất. Mô hình này sử dụng các nguồn dữ liệu địa hình dựa trên GIS, DEM. Do đó, dữ liệu bề mặt địa hình của trang trại như độ nhám và độ cao được trình bày trực quan và rõ ràng. Khi đó, chỉ cần có dữ liệu về tài nguyên gió tại một điểm trong khu vực trang trại. Phương pháp CFD sẽ tiến hành mô phỏng toàn bộ quá trình tương tác của tài nguyên gió này với địa hình cụ thể. Từ đó, các đặc điểm của tài nguyên

gió tại mỗi vị trí khác trong khu vực trang trại gió được xác định với độ chính xác cao. Do đó, các chủ đầu tư không cần tiến hành xây dựng các trạm đo đặc nhiều, giảm bớt tổn kém và thời gian. Đây là một lợi thế lớn của CFD so với tất cả các phương pháp khác. Rõ ràng, mô hình kết hợp GIS – CFD có nhiều tính năng nổi bật trong việc giải quyết các vấn đề khí động học của trang trại gió.

Các lý thuyết Jensen và BEM thực hiện các phép tính để xác định AEP dựa trên kết quả thu được từ mô hình mô phỏng GIS – CFD. Việc kết hợp đồng thời các lý thuyết và mô hình mô phỏng làm cho mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này trở nên hoàn hảo, đồng thời đánh giá nhiều yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến AEP của một trang trại gió trên bờ.

KẾT LUẬN

Luận án này đã tiến hành nghiên cứu xây dựng và đề xuất các mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt tuabin cho các trang trại điện gió trên bờ. Các mô hình này bao gồm ba phần chính: xác định vị trí khu vực có tiềm năng năng lượng gió cao, biên dạng cánh tuabin cho hệ số công suất lớn và cấu hình lắp đặt tuabin cho sản lượng điện hàng năm lớn nhất.

Các mô hình thiết kế này bao gồm cả lý thuyết phân tích và phương pháp mô phỏng số. Mô hình lý thuyết giúp xác định mối quan hệ giữa các đại lượng mô tả hoạt động của tuabin gió. Mô hình mô phỏng giúp hiệu chỉnh các giá trị tốc độ gió, cường độ chảy rối, tần số tốc độ gió và hướng gió tại các vị trí trong khu vực phát triển trang trại điện gió. Các mô hình này rất phù hợp và tổng quát với điều kiện thực tế tại Việt Nam. Có thể áp dụng rộng rãi mô hình này cho tất cả các khu vực tại Việt Nam và trên thế giới.

Ngoài ra, điều kiện biên của các mô hình là điều kiện địa hình, và điều kiện ban đầu là đặc điểm tài nguyên gió. Do đó, các mô hình thiết kế này chỉ cần dữ liệu tài nguyên gió được đo tại một vị trí trong khu vực trang trại. Sau đó, toàn bộ quá trình chuyển động, tương tác và biến đổi của các đặc điểm tài nguyên gió theo địa hình sẽ được mô tả chính xác bằng mô hình GIS - CFD. Từ đó, một số trường hợp phân tích rủi ro giả định trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt cũng có thể dễ dàng được xác định, giúp giảm thiểu các vấn đề liên quan đến sự cố và tai nạn trong suốt vòng đời của tuabin. Đây cũng là một lợi thế lớn của mô hình so với các mô hình thiết kế khác.

Các mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này rất hiệu quả và trực quan. Tuy nhiên, các mô hình tham gia như GIS và CFD là các mô hình dữ liệu lớn hiện đại. Để sử dụng các công cụ này, cần có một hệ thống máy tính với cấu hình đủ lớn và người thực hiện các phân tích này phải có đủ kiến thức và kinh nghiệm. Đặc biệt là kinh nghiệm trong việc lựa chọn loại lưới, tạo lưới, lựa chọn bộ giải, mô hình chảy rối trong các mô hình mô phỏng CFD.

Một số đóng góp khoa học và thực tiễn mới:

- Về mặt khoa học: Luận án này nghiên cứu và đề xuất các mô hình thiết kế dựa trên sự kết hợp của lý thuyết BEM, lý thuyết Jensen và các mô hình mô phỏng số hiện đại như GIS, CFD. Mô hình GIS sử dụng các nguồn dữ liệu không gian lớn, độ phân giải cao để xác định chính xác các đặc điểm địa hình của khu vực trang trại gió. Mô hình CFD là các công cụ phân tích và mô phỏng hiện đại. Hệ thống các phương trình bảo toàn được sử dụng để mô tả chính xác và trực quan tất cả các tương tác có thể có của tài nguyên gió trong khu vực trang trại. Việc xác định phương pháp tạo lưới, lựa chọn mô hình dòng chảy rối, điều kiện biên và điều kiện ban đầu đóng vai trò quyết định đến độ chính xác của các mô hình mô phỏng CFD. Các thông số cụ thể của mô hình mô phỏng CFD được sử dụng trong luận án này là những đóng góp khoa học mới. Các nhà khoa học khác có thể tham khảo để sử dụng đối với các mục đích phân tích, mô phỏng khác nhau.

- Về mặt thực tiễn: Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ năng lượng tái tạo. Trong đó, điện gió sẽ đóng góp một tỷ trọng lớn vào cơ cấu nguồn điện trong tương lai. Hiện nay, Việt Nam đang trong quá trình triển khai nhiều dự án điện gió trên bờ và ngoài khơi. Luận án này cung cấp các mô hình thiết kế biên dạng cánh quạt và cấu hình lắp đặt của các trang trại điện gió trên bờ. Những mô hình này có thể góp phần vào hiệu quả quản lý và đầu tư của các dự án điện gió trên bờ tại Việt Nam. Cụ thể, luận án đã đóng góp 02 mô hình thiết kế mới, bao gồm:

+ Đề xuất mô hình thiết kế biên dạng cánh quạt tuabin theo điều kiện tài nguyên gió thực tế tại Việt Nam, nhằm đạt được hệ số công suất lớn nhất.

+ Đề xuất mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin của các trang trại điện gió trên bờ theo điều kiện địa hình và tài nguyên gió thực tế tại Việt Nam, nhằm đạt được giá trị AEP lớn nhất.

Các nội dung liên quan chưa được thực hiện:

- Mô hình thiết kế cánh tuabin chỉ dừng lại ở mục tiêu thiết kế biên dạng cánh để đạt hiệu quả khai thác năng lượng gió cao nhất. Luận án chưa xem xét các vấn đề khác nhau về vật liệu, kết cấu, khả năng sản xuất, chi phí, vv...

- Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin trong các trang trại gió chỉ cung cấp các cấu hình vị trí cụ thể và sau đó tính toán giá trị sản lượng điện hàng năm. Luận án này chưa xem xét toàn diện các loại tuabin khác nhau và chưa khảo sát chi tiết hiệu ứng luồng gió xoáy theo các hướng khác nhau. Do đó, kết quả ứng dụng ban đầu của mô hình vẫn còn hạn chế. Những hạn chế này phần lớn là do thiếu dữ liệu thực tế từ các trang trại gió ở Việt Nam. Mô hình hoàn toàn có thể tính toán ra các kết quả nhưng lại không có dữ liệu thực nghiệm để có thể kiểm chứng.

Định hướng nghiên cứu tương lai:

Các kết quả trình bày trong luận án này chỉ là bước đầu tiên. Trong thời gian tiếp theo, các hướng nghiên cứu liên quan đến việc lựa chọn vật liệu để chế tạo cánh tuabin và công nghệ chế tạo cánh tuabin dựa trên các công nghệ hiện đại như in 3D sẽ được ưu tiên. Ngoài ra, các nghiên cứu sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo cũng sẽ được tiến hành để có thêm sự so sánh và kiểm chứng với các kết quả thu được từ các mô hình được đề xuất trong luận án này.

DANH SÁCH CÁC CÔNG BỐ KHOA HỌC

Các kết quả nghiên cứu được công bố trong giai đoạn 2022 - 2025 liên quan đến nội dung luận án: 02 bài báo được đăng trên các tạp chí khoa học quốc tế thuộc danh mục SCIE Q1; 01 bài báo được đăng trên tạp chí khoa học quốc tế thuộc danh mục ESCI Q2; 02 bài báo được đăng trên các tạp chí khoa học quốc tế thuộc danh mục Scopus Q3; 04 báo cáo hội nghị khoa học quốc tế thuộc danh mục Scopus; 04 bài báo được đăng trên các tạp chí khoa học trong nước thuộc danh mục tính điểm của Hội đồng Giáo sư Nhà nước.

Bảng 6.1. Danh sách các bài báo khoa học đã được công bố

STT	Bài báo	Năm	Tạp chí
1	Technology trends in onshore wind turbine design – Performance assessment in Vietnam	2025	2 nd Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM), Hanoi, Vietnam, 2025, pp. 1-5. IEEE Xplore. (Scopus)
2	Study on design of NREL 5MW equivalent turbine blade using VAST-EPU-N6409 airfoil model	2025	2 nd Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM), Hanoi, Vietnam, 2025, pp. 1-4. IEEE Xplore. (Scopus)
3	A proposed airfoil configuration to improve aerodynamic efficiency applied in the design of small wind turbines.	2025	Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Vol. 133, No. 2, pp. 140 - 154. https://doi.org/10.37934/arfmts.133.2.140154 . ISSN: 2289 – 7879. (Scopus Q3)
4	Optimization method of wind turbine locations in complex terrain areas using a	2025	IEEE Access, Vol. 13, pp. 114384 - 114400. https://doi.org/10.1109/ACCESS.

STT	Bài báo	Năm	Tạp chí
	combination of simulation and analytical models.		2025.3584560 . ISSN: 2169 - 3536. (SCIE Q1)
5	A method to design an efficient airfoil for small wind turbines in low wind speed conditions using XFLR5 and CFD simulations.	2024	Energies, Vol. 17, No. 16, pp. 1 - 19. https://doi.org/10.3390/en17164113 . eISSN: 1996 - 1073. (SCIE Q1)
6	Analysis and comparison of aerodynamics of NACA airfoils under low wind speed conditions.	2024	Hanoi University of Industry Journal of Science and Technology, Vol. 60, No. 7, pp. 150 - 156. P-ISSN: 1859-3585; E-ISSN: 2615-9619
7	Consideration of various configurations of SG6043-based rotor applied in small capacity horizontal axis wind turbine.	2024	Int. J. Renew. Energy Dev., Vol. 13, No. 3, pp. 396 - 404. https://doi.org/10.61435/ijred.2024.60036 . ISSN: 2252 - 4940. (ESCI Q2)
8	Aerodynamic analysis of NACA64A010 airfoil using XFLR5 and ANSYS Fluent.	2024	GMSARN International Journal, Vol. 18, No. 2, pp. 258 - 266. ISSN: 1905 - 9094. (Scopus Q3)
9	Modifying NACA6409 airfoil configuration to improve aerodynamic performance in low wind speeds.	2023	1 st Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM), Hanoi, Vietnam, pp. 1-5. IEEE Xplore. https://doi.org/10.1109/EEE-AM58328.2023.10395332 . (Scopus)

STT	Bài báo	Năm	Tạp chí
10	Study to evaluate the effect of terrain surface on performance of a wind farm in Ninh Thuan province, Vietnam.	2023	E3S Web of Conferences Vol. 470, ID. 01038, pp. 1 – 11. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202347001038 . eISSN: 2267-1242. (Scopus)
11	Evaluating the wind resources in an area that is equivalent to the size of a wind power plant: a methodology.	2023	TNU Journal of Science and Technology, Vol. 228, No. 02, pp. 343 – 351. ISSN: 1859 - 2171, 2374 - 9098; e-ISSN: 2615 - 9562.
12	Analysis of aerodynamic parameters of the S1210 wind turbine airfoil under the condition of low Reynolds number.	2022	UD-JST, Vol. 20, No. 10.1, pp. 77 – 81. ISSN: 1859 -1531.
13	Aerodynamic analysis of NACA6409 airfoil in wind turbine by using Panel method.	2022	TNU Journal of Science and Technology, Vol. 227, No. 8, pp. 227 – 235; ISSN: 1859-2171, 2374-9098; e-ISSN 2615-9562.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] World Meteorological Organization (2025), *State of the Global Climate 2024*, WMO-No. 1368, ISBN 978-92-63-11368-5, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.

[2] Decision No. 2157/QĐ-TTg dated December 21, 2021 of the Prime Minister on the establishment of the National Steering Committee to implement Vietnam's commitments at the COP26 Conference.

[3] Decision No. 1009/QĐ-TTg dated August 31, 2023 of the Prime Minister on the approval of the Project for the implementation of the Political Declaration on the establishment of the Just Energy Transition Partnership (JETP).

[4] Decision No. 768/QĐ-TTg dated April 15, 2025 of the Prime Minister on the approval of the adjusted Power Plan VIII.

[5] EVN, Updated to April 30, 2025: 30 transitional renewable energy projects have generated more than 6.082 billion kWh to the grid, <https://www.evn.com.vn/d/vi-VN/news/Cap-nhat-den-ngay-3042025-30-du-an-NLTT-chuyen-tiep-da-phat-hon-6082-ty-kWh-len-luoi--60-2014-502708>

[6] Global Wind Energy Council (2025), *Global Wind Report*, The Unicorn Factory, Av. Infante D. Henrique 143 S09, Lisbon. Portugal.

[7] Decision approving the electricity generation price framework for wind power plants in 2025, 1508/QĐ-BCT dated May 30, 2025 of the Minister of Industry and Trade.

[8] Decision approving the electricity generation price framework for offshore wind power plants in 2025, 1824/QĐ-BCT dated June 26, 2025 of the Minister of Industry and Trade.

[9] Hiep Van Nguyen, Pham Xuan Thanh, Nguyen Duc Nam, Nguyen Xuan Anh, Pham Le Khuong, Hoang Hai Son, Nguyen Tien Manh, and Pham Chi Cong (2021), “Observation and Simulation of Wind Speed and Wind Power Density over Bac Lieu Region”, *Advances in Meteorology*, Volume 2021, Article ID 8823940, 17 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/8823940>

[10] Quang Vu Dinh, Quang-Van Doan, Thanh Ngo-Duc, Van Nguyen Dinh, Nguyen Dinh Duc (2022), “Offshore wind resource in the context of global climate change over a tropical area”, *Applied Energy* 308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118369>.

[11] Nguyen Thi Thanh Nguyet, Du Van Toan (2023), “Marine spatial planning for offshore wind power using GIS”, *Journal of Environment*, No. 1, pp. 41-47.

[12] Nguyen Van Doai (2017), “Study the overview of wind turbines and the factors that affect the power output of the turbine”, *Journal of Science of Lac Hong University*, Special issue, pp. 21-25.

[13] Nguyen The Mich, Do Huy Cuong, Doan Kim Binh (2017), “Research and calculation design for counter – rotating wind turbine use with low wind speed range”, *The Vietnam Journal of Mechanical Engineering*, No.9.

[14] Minh Bach Duc, Hung Tran The, Nguyen Dinh Duc, Trinh Chu Duc, Anh Dinh Le (2023), “Performance enhancement of savonius wind turbine by multicurve blade shape”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Volume 45, Issue 1.

[15] Nguyen Xuan Truong, Nguyen Trung Hieu, Nguyen Van Vuong (2017), “Aerodynamics of 2 kW vertical wind turbine”, *National Conference on Solid State Physics and Materials Science – SPMS 2017*, pp. 629 – 633.

[16] Xiao Yu Tang, Shumian Zhao, Bo Fan, Joachim Peinke, Bernhard Stoevesandt (2019), “Micro-scale wind resource assessment in complex terrain based on CFD coupled measurement from multiple masts”, *Applied Energy* 238.

[17] Nicolo Pollini (2022), “Topology optimization of wind farm layouts”, *Renewable Energy* 195.

[18] A. Z. Dhunny, M. R. Lollchund, S. D. D. V. Rughooputh (2017), “Wind energy evaluation for a highly complex terrain using Computational Fluid Dynamics (CFD)”, *Renewable Energy* 101.

[19] Madsen, M. H. A., Zahle, F., Horcas, S. G., Barlas, T. K., & Sørensen, N. N. (2022), “CFD-based curved tip shape design for wind turbine blades”, *Wind Energy Science*, Vol. 7, No. 4.

[20] Devashish Jha, Saket Saurabh (2023), “NACA2412 airfoil based method for design and aerodynamic analysis of small HAWT using modified BEM approach”, *Science and Technology for Energy Transition* 78, 2.

[21] Hamed Sedighi, Pooria Akbarzadeh, Ali Salavatipour (2020), “Aerodynamic performance enhancement of horizontal axis wind turbines by dimples on blades: Numerical investigation”, *Energy* 195.

[22] M. E. Nakhchi, S. Win Naung, M. Rahmati (2021), “High-resolution direct numerical simulations of flow structure and aerodynamic performance of wind turbine airfoil at wide range of Reynolds numbers”, *Energy* 225.

[23] Widad Yossri, Samah Ben Ayed, Abdessattar Abdelkefi (2021), “Airfoil type and blade size effects on the aerodynamic performance of small-scale wind turbines: Computational fluid dynamics investigation”, *Energy* 229.

[24] Joseph B. Olson, et al. (2019), “Improving Wind Energy Forecasting through Numerical Weather Prediction Model Development”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 100, No. 11, pp: 2201–2220. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0040.1>

[25] Jin, C., Yang, Y., Han, C., Lei, T., Li, C., & Lu, B. (2024), “Evaluation of forecasted wind speed at turbine hub height and wind ramps by five NWP models with observations from 262 wind farms over China”, *Meteorological Applications*, 31 (6). <https://doi.org/10.1002/met.70007>

[26] Mao Yang, Yunfeng Guo, Tao Huang, Wei Zhang (2025), “Power prediction considering NWP wind speed error tolerability: A strategy to improve the accuracy of short-term wind power prediction under wind speed offset scenarios”, *Applied Energy*, Vol. 377, Part D, 124720. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124720>

[27] C. L. Huang, Y. K. Wu, Q. T. Phan, C. C. Tsai and J. S. Hong (2025), "Enhancing Wind Power Forecasts via Bias Correction Technologies for Numerical Weather Prediction Model", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 61, no. 4, pp. 5406-5419, July-Aug. 2025, doi: 10.1109/TIA.2025.3546589

[28] J. Perr-Sauer, C. Tripp, M. Optis and J. King (2020), “Short-term wind forecasting using statistical models with a fully observable wind flow”, *Journal of Physics: Conference Series* 1452, 012083. doi:10.1088/1742-6596/1452/1/012083

[29] Hao Liu, Huimin Ma, Tianyu Hu (2023), “Enhancing Short-Term Wind Speed Forecasting using Graph Attention and Frequency-Enhanced Mechanisms”, *arXiv:2305.11526v2* [cs.LG]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.11526>

[30] Zhu, J.; Zhao, Z.; Zheng, X.; An, Z.; Guo, Q.; Li, Z.; Sun, J.; Guo, Y. (2023), “Time-Series Power Forecasting for Wind and Solar Energy Based on the SL-Transformer”, *Energies*, 16, 7610. <https://doi.org/10.3390/en16227610>

[31] Wu, Z., et al. (2022), “A comprehensive review on deep learning approaches in wind forecasting applications”, *CAAI Trans. Intell. Technol.* 7 (2), 129–143. <https://doi.org/10.1049/cit2.12076>

[32] Yang Zhang, Lingbo Liu, Xinyu Xiong, Guanbin Li, Guoli Wang, Liang Lin (2023), “Long-term Wind Power Forecasting with Hierarchical Spatial-Temporal Transformer”, *arXiv:2305.18724v1* [cs.LG]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.18724>

[33] T. Kouser et al. (2025), "Machine Learning Approach to Aerodynamic Analysis of NACA0005 Airfoil: ANN and CFD Integration", *IEEE Access*, vol. 13, pp. 131088-131101, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3592338

[34] Pilar Díaz-Cuevas (2018), "GIS-Based Methodology for Evaluating the Wind-Energy Potential of Territories: A Case Study from Andalusia (Spain)", *Energies*, 11, 2789; doi:10.3390/en1102789

[35] Flora, F.M.I., Donatien, N., Tchinda, R. and Hamandjoda, O. (2021), "Selection Wind Farm Sites Based on GIS Using a Boolean Method: Evaluation of the Case of Cameroon", *Journal of Power and Energy Engineering*, 9, 1-24. <https://doi.org/10.4236/jpee.2021.91001>

[36] Abdullah Demir, Ali Ersin Dinçer, Cihan Çiftçi, Sedat Gülçimen, Nigmet Uzal, Kutay Yılmaz (2024), "Wind farm site selection using GIS-based multicriteria analysis with Life cycle assessment integration", *Earth Science Informatics* 17:1591–1608. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01227-4>.

[37] GitHub, Inc. BlenderGIS. Available at: <https://github.com/domlysz/BlenderGIS> (accessed July 26, 2025).

[38] T Koblitz, A Bechmann, J Berg, A Sogachev, N Sørensen and P-E Rethore (2014), "Atmospheric stability and complex terrain: comparing measurements and CFD", *Journal of Physics: Conference Series* 555 012060. doi:10.1088/1742-6596/555/1/012060

[39] Ansys Inc., what is computational fluid dynamics, <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics> (accessed July 26, 2025).

[40] Naveen N. Kethavath, Niranjan S. Ghaisas (2024), "Effect of an abrupt rough-to-smooth surface roughness transition on wind farm wakes: An LES and analytical modeling study", *J. Renewable Sustainable Energy* 16, 033302. <https://doi.org/10.1063/5.0202733>.

[41] Ansys innovation courses, Calculating Turbulent Intensity, <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/topics-in-turbulence-modeling-using-ansys-fluent/lessons/calculating-turbulent-intensity/>. (accessed July 26, 2025).

[42] Sogachev A. (2009), "Boundary-Layer", *Meteorol.* Vol.130, pp. 423–435

[43] F. González-Longatt, P. Wall, V. Terzija (2012), "Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior", *Renewable Energy* 39 329-338. Doi:10.1016/j.renene.2011.08.053.

[44] Peña, A., Réthoré, P. E., & Rathmann, O. (2014), “Modeling large offshore wind farms under different atmospheric stability regimes with the Park wake model”, *Renewable Energy*, 70, 164–171. doi:10.1016/j.renene.2014.02.019

[45] James Manwell, Jon McGowan, and Anthony Rogers (2009), *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd.

[46] Magdi R. and Adam M. R. (2011), *Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. ISBN: 978-953-307-508-2. InTech.

[47] Ding, J. J., Wang, H., Sun, L. P. and Ma, B. (2013), “Optimal Design of Wind Turbine Blades with Wilson and BEM Method Integrated”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 404, pp. 286–291. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.404.286>.

[48] Raghavendra S., Ravikumar T., Gnaendra R., Manjunatha K. and Madhusudhana S. (2020), “Design of wind blades for the development of low-power wind turbines using Betz and Schmitz methods”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, volume 8 (1), 808-827. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1833605.

[49] S. Xueyi, W. Lin, L. Xianwu (2021), “Airfoil optimization using a machine learning-based optimization algorithm,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2217. DOI:10.1088/1742-6596/2217/1/012009.

[50] M. Drela (1989), “XFOIL: An Analysis and Design System For Low Reynolds Number Airfoils,” MIT Dept. of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, Massachusetts.

[51] A. Septiyana, K. Hidayat, A. Rizaldi, Y. Wijaya (2020), “Comparative study of wing lift distribution analysis using numerical method”, *Jurnal Teknologi Dirgantara*, vol. 18, no. 2, pp. 129-139.

[52] M. Selig, M. Maughmert (1992), “Multipoint inverse airfoil design method based on conformal mapping”, *AIAA Journal*, vol. 30, no. 5.

[53] Qblade Homepage (2025) Qblade Documentation. <https://docs.qblade.org/>. (accessed July 26, 2025).

[54] Bangga, G., Parkinson, S., Collier, W. (2023), “Development and validation of the iag dynamic stall model in state-space representation for wind turbine airfoils”, *Energies*, volume 16 (10), 1-25. <https://doi.org/10.3390/en16103994>.

[55] F. González-Longatt, P. Wall, V. Terzija (2012), “Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior”, *Renewable Energy* 39 329-338. Doi:10.1016/j.renene.2011.08.053.

[56] Barthelmie, R. J., Folkerts, L., Larsen, G. C., Rados, K., Pryor, S. C., Frandsen, S. T., Lange, B., & Schepers, G. (2006), “Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 888-901. <https://doi.org/10.1175/JTECH1886.1>

[57] Gögmen, T., van der Laan, P., Réthoré, P. E., Pena Diaz, A., Larsen, G. C., & Ott, S. (2016), “Wind turbine wake models developed at the Technical University of Denmark: A review”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 60, 752–769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.113>.

[58] Lattawan Niyomtham, Charoenporn Lertsathittanakorn, Jompob Waewsak and Yves Gagnon (2022), “Mesoscale/Microscale and CFD Modeling for Wind Resource Assessment: Application to the Andaman Coast of Southern Thailand”, *Energies*, 15, 3025. <https://doi.org/10.3390/en15093025>.

[59] Z. R. Shu and Mike Jesson (2021), “Estimation of Weibull parameters for wind energy analysis across the UK”, *J. Renewable Sustainable Energy* 13, 023303; doi: 10.1063/5.0038001.

[60] Stehly, Tyler, P. Beiter and P. Duffy. (2020), “Cost of Wind Energy Review”, *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-5000-78471. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf>.

[61] B. Thomas, X. Costoya, M. deCastro, D. Carvalho, M. Gomez-Gesteira (2024), “Wake effect impact on the levelized cost of energy in large floating offshore wind farms: A case of study in the northwest of the Iberian Peninsula,” *Energy* Vol. 304, 132159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132159>.

[62] World Bank Group (2025), “Global Wind Atlas”, [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/en/area/Vietnam/Ninh%20Thu%E1%BA%ADn>. (accessed July 26, 2025)..

[63] L. K. Berg, M. Pekour, D. Nelson (2012), “Description of the Columbia Basin Wind Energy Study (CBWES)”, *The U.S. Department of Energy*, PNNL-22036.

[64] N. K. Naveen, S. G. Niranjan (2024), “Effect of an abrupt rough-to-smooth surface roughness transition on wind farm wakes: An LES and analytical modeling study”, *J. Renewable Sustainable Energy* 16, 033302. <https://doi.org/10.1063/5.0202733>.

- [65] H. G. Kim, Y. H. Kang and J. Y. Kim (2017), "Evaluation of wind resource potential in mountainous region considering morphometric terrain characteristics," *Wind Engineering*, Vol. 41(2) 114–123. <https://doi.org/10.1177/0309524X16689445>
- [66] B. Yang, Y. Qian, L. K. Berg, P. L. Ma, S. Wharton, V. Bulaevskaya, H. Yan, Z. Hou, W. J. Shaw (2016), "Sensitivity of Turbine-Height Wind Speeds to Parameters in Planetary Boundary-Layer and Surface-Layer Schemes in the Weather Research and Forecasting Model", *Boundary-Layer Meteorol* 162 (1), 117–142. DOI: 10.1007/s10546-016-0185-2
- [67] National Weather Service – USA (2025), "Beaufort Wind Scale", [Online]. Available: <https://www.weather.gov/mfl/beaufort> (accessed July 26, 2025).
- [68] IEC 61400-1 (2019), "*Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements*", IEC, Geneva, Switzerland.
- [69] Michael S. Selig, James J. Guglielmo, Andy P. Broeren and Philippe Giguere (1996), "Summary of Low-Speed Airfoil Data, Volume 1", SoarTech Publications, Virginia Beach, Virginia.
- [70] Suresh A., Raja kumar S., Belqasem A., Sudhakar Babu T. (2024), "Investigations of the performance of 3D printed micro wind turbine composed of PLA material", *Heliyon* 10 e25356, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25356>
- [71] Mohammad S. , Ahmad A., Ghayda' A., Abdullah M., Mohamed R. (2023), "An investigation of a 3D printed micro-wind turbine for residential power production", *Int. J. Renew. Energy Dev.*, 12 (3), 550-559. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.52615>
- [72] Jakub J., Bogdan B., Joanna W., Adam J., Alexander K., Mariusz F, (2025), "Energy potential and economic viability of small-scale wind turbines", *Energy* 322 135608, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135608>
- [73] The Wind Power (2025), "Enercon E103/2350", *The Wind Power*, [Online]. Available: https://www.thewindpower.net/turbine_en_1107_enercon_e103-2350.php. (accessed July 26, 2025).
- [74] Viuredelaire, "Aerogenerator Enercon E-103 EP2", *Viuredelaire*, [Online]. Available: <https://www.viuredelaire.cat/index.php?md=articles&id=13543&lg=eng>. (accessed July 26, 2025).

[75] Huynh Kim An (2010), “Assessment of wind energy potential based on data in Phan Rang - Ninh Thuan published by the WorldBank”, *Power Engineering Consulting Joint Stock Company* 4.

[76] AWS Truepower llc. (2011), [Online]. Available: https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/MOIT_Vietnam_Wind_Atlas_Report_18Mar2011.pdf. (accessed July 26, 2025).

[77] MedCalc (2024), Weibull distribution functions, MedCalc Software Ltd., [Online]. Available: <https://www.medcalc.org/manual/weibull-distribution-functions.php>. (accessed July 26, 2025).

[78] IEC 61400-12-1 (2022), “*Wind energy generation systems –Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*”, IEC, Geneva, Switzerland.

[79] IEC 61400-12-5 (2022), “*Wind energy generation systems – Part 12-5: Power performance – Assessment of obstacles and terrain*”, IEC, Geneva, Switzerland.

[80] IRENA (2025), “Renewable power generation costs in 2024”, *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-669-5