

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม กล่าวคือพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในภาคตัดขวางของโลกประมาณ 178,000 ล้านล้านวัตต์ มีเพียง 0.2% เท่านั้นที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของอากาศที่เรียกว่า พลังงานลม และส่วนนี้ก็ยังส่งผลให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย

ลมในชั้นบรรยากาศโลก (Planetary Boundary Layer) สามารถอธิบายการกระจายทางตั้งของอัตราเร็วลมในแนวราบเหนือพื้นดินได้โดยอาศัยสมการกึ่งทดลอง (Semi-Empirical Relationship) ที่เรียกว่าสมการโปรไฟล์ลมแบบลอการิทึม (Log Wind Profile) แสดงดังสมการที่ 2.1 ซึ่งมักจะจำกัดอยู่ในระดับความสูงไม่เกิน 100 m จากพื้นดิน

ในบรรยากาศอิสระ (Free Atmosphere) เรามักจะใช้ความสัมพันธ์ของลมจีโอสโทรฟิก (Geostrophic Wind) ซึ่งมีสมการสำหรับการประมาณอัตราเร็วลม (u) ที่ระดับความสูง z (m) เหนือพื้นดินดังนี้

$$u_z = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + \psi(z, z_0, L) \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ	u_*	คือ	ความเร็วเสียดทาน (Friction Velocity) หรือ ความเร็วเฉือน (Shear Velocity)
	k	คือ	ค่าคงที่ของ Von Karman (0.41)
	d	คือ	การกระจัดแนวราบค่าศูนย์ (Zero Plane Displacement)
	z_0	คือ	ความขรุขระของพื้นผิว (Surface Roughness)
	ψ	คือ	เสถียรภาพ (Stability)
	L	คือ	พารามิเตอร์เสถียรภาพของ Monin-Obukhov

ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแบบศูนย์กลาง (Neutral Stability) $z/L = 0$ และเทอม ψ จะมีค่าเป็นศูนย์ การกระจัดแนวราบค่าศูนย์เป็นความสูง (m) เหนือพื้นดินเมื่ออัตราเร็วลมมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากพฤติกรรมไหลผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้และอาคาร เป็นต้น โดยมักจะประมาณให้มีค่าเท่ากับ $2/3$ ของความสูงเฉลี่ยของสิ่งกีดขวางนั่นเอง

ระยะขรุขระ (Roughness Length) z_0 เป็นเทอมที่ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของความขรุขระของพื้นผิวที่มีต่ออิทธิพลของการไหล โดยมีค่าระหว่าง $1/10$ ถึง $1/30$ ของความสูงเฉลี่ยของความขรุขระบนพื้นดิน ค่าระยะขรุขระของสภาพพื้นผิวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระยะขรุขระของสภาพพื้นผิว

พื้นผิว	ระยะขรุขระ (m)
พื้นผิวเรียบหรือพื้นน้ำ	0.0002
พื้นราบหรือพื้นที่ผิวที่มีหญ้าปกคลุม	0.03
พื้นที่เพาะปลูก	0.1-0.25
พื้นที่ป่า	0.5-1.0
ลักษณะภูมิประเทศที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก	มากกว่า 1.0

สมการโปรไฟล์ลมแบบลอการิทึมมักจะได้รับการยอมรับในการประมาณค่าอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงอื่นๆเหนือพื้นดินมากกว่ากฎโปรไฟล์ลมแบบยกกำลัง (Wind Profile Power Law) แสดงดังสมการที่ 2.2 โดยสมการโปรไฟล์ลมแบบยกกำลังมักจะใช้กันในกรณีเงื่อนไขเสถียรภาพแบบศูนย์กลาง (Neutral Stability) และในกรณีที่ไม่มีข้อมูลความขรุขระของพื้นผิว

$$\frac{V_z}{V_r} = \left(\frac{h_z}{h_r} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

เมื่อ	V_z	คือ	อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง z (m/s)
	V_r	คือ	อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงอ้างอิง (m/s)
	h_z	คือ	ความสูงที่ระดับ z (m)
	h_r	คือ	ความสูงที่ระดับอ้างอิง (m)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม (Wind Shear Coefficient) (ไร้นหน่วย)

ในการวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมใกล้ชายฝั่งทะเลจะพิจารณาการจัดวางตำแหน่งของกังหันลมในฟาร์มกังหันลมโดยใช้หลักเกณฑ์การวางตำแหน่ง 5DX10D เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากอิทธิพลของเวก

ลมที่เคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีพลังงานลดลงซึ่งจะไปตามกฎของอนุรักษ์พลังงาน ลมที่เคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีอัตราเร็วลดลงและเกิดเป็นกลุ่มลมด้านหลังและมีความปั่นป่วนเมื่อเปรียบเทียบกับลมด้านหน้ากังหัน ดังนั้นการจัดวางกังหันลมสำหรับฟาร์มกังหันจึงมักจะจัดวางให้ห่างกันอย่างน้อยเป็นระยะ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเพื่อหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนทางด้านหลังของกังหันลมซึ่งอาจจะเป็นด้านหน้าของกังหันลมตัวอื่นๆ นั่นเอง

ในการประเมินทางด้านเทคนิคของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนั้นได้พิจารณาพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (Annual Energy Production: AEP) และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยอาศัยค่าคาปาซิตีแฟกเตอร์ (Capacity Factor: C.F.)

1. พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (Annual Energy Production)

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (AEP) ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม WAsP 11.0 ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยค่ากำลังการผลิตเต็มพิกัด (Rated Capacity) ของกังหันลม โดยในการศึกษาความ

เป็นไปได้นี้ได้อาศัยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตติดตั้งขนาด 2.0-5.0 MW สำหรับการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี

2. ค่าประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม

ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมอาศัยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เรียกว่า Capacity Factor (C.F.) โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.3

$$C.F. = \text{Annual Energy Production} / (8,760 \times \text{Rated Capacity of WTG}) \quad (2.3)$$

ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมในกรณีที่ยังไม่มี การติดตั้งกังหันลมได้

2.2 เงื่อนไขของลม (Wind Conditions)

คุณลักษณะของลมสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพเป็นอย่างมากซึ่งโดยทั่วไปลมมักจะเกิดจากความแตกต่างของความกดอากาศเนื่องจากการได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในแต่ละบริเวณที่แตกต่างกัน นอกจากนี้บริเวณใกล้ทะเลยังมีอิทธิพลของลมบก-ลมทะเล (Land-Sea Breeze) อีกด้วย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมง วัน และฤดูกาล หรือความเร็วลมในระยะยาว สำหรับช่วงระยะเวลาสั้นๆ เช่น 10 นาที ลมมักจะได้รับอิทธิพลจากการแพร่กระจายความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation)

สำหรับวัตถุประสงค์ของการออกแบบภาระของกังหันลมเนื่องจากลมแล้ว เราสามารถพิจารณา ลมออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

- (1) ลมนิ่ง (Sustained)
- (2) ลมกรรโชก (Gust)
- (3) ลมปั่นป่วน (Turbulence)

ในการศึกษาเชิงจำลองแบบ (Simulation) มักจะอาศัยข้อมูลลมที่เป็นอนุกรมเวลา (Time Series Data) ซึ่งจะพิจารณาทั้งอัตราเร็วลม (Speed) และทิศทาง (Direction) การเปลี่ยนแปลงของลมในช่วงระยะเวลามักจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเราจึง จำแนกพฤติกรรมของลมเป็นในช่วงระยะเวลาสั้น (Short Term Wind) ระยะเวลายาว (Long Term Wind) และลมขีดสุด (Extreme Winds)

2.2.1 ลมในช่วงระยะเวลาสั้น (Short Term Wind)

ลมในช่วงระยะเวลาสั้นมักจะพิจารณาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ในช่วงระยะเวลา 10 นาที โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4

$$u = U + \tilde{u} \quad (2.4)$$

เมื่อ U คือ อัตราเร็วเฉลี่ย (Mean Speed)

\tilde{u} คือ องค์ประกอบ การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วลม (Fluctuating Component)

อัตราเร็วลมเฉลี่ยสำหรับจำนวนข้อมูล N_s หาได้จากสมการที่ 2.5

$$U = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} u_i \quad (2.5)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหาได้จากสมการที่ 2.6

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - U)^2} \quad (2.6)$$

การแจกแจงแบบต่อเนื่อง (Continuous Distribution) ของอัตราเร็วลมในช่วงระยะเวลาสั้นๆ สามารถประมาณได้โดยใช้การแจกแจงแบบปกติดังนี้

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(u - U)^2}{2\sigma_u^2}\right] \quad (2.7)$$

ความปั่นป่วนของลมมักจะมีรูปร่างแบบคลื่นไซน์ซึ่งประกอบไปด้วยขนาด (Magnitude) และความถี่ (Frequency) ซึ่งสามารถพิจารณาจากความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) ของ Von Karman Spectrum

$$S_u(f) = \frac{\sigma_u^2 4(L/U)}{[1 + 70.8(fL/U)^2]^{5/6}} \quad (2.8)$$

หรือจาก Kaimal Spectral

$$S_u(f) = \frac{\sigma_u^2 4(L/U)}{[1 + 6(fL/U)]^{5/3}} \quad (2.9)$$

2.2.2 ลมในช่วงระยะเวลายาว (Long Term Wind)

เงื่อนไขของลมในระยะยาวมักจะพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วลมในระยะยาว \bar{U} และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในระยะยาว σ_U

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (2.10)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของจุดข้อมูลระยะยาว

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} \quad (2.11)$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ของข้อมูลลมระยะยาวมักจะใช้การแจกแจงเรลลีย์ (Rayleigh Distribution) และการแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) อธิบาย ฟังก์ชันการแจกแจงเรลลีย์แสดงดังสมการที่ 2.12

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}^2} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}^2} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

เมื่อแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นสะสม (Cumulative Density Function) ฟังก์ชันราลีย์จะสามารถเขียนได้เป็น

$$F(U) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}^2} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ $F(U)$ หมายถึง ความน่าจะเป็นซึ่งอัตราเร็วลมมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ U ฟังก์ชันการแจกแจงไวล์บูลล์แสดงดังสมการที่ 13

$$p(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (2.14)$$

เมื่อแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นสะสม ฟังก์ชันไวล์บูลล์จะมีรูปร่างหน้าตาตั้งสมการที่ 14

$$F(U) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (2.15)$$

เมื่อ c คือ ปัจจัยสเกล (Scale Factor) และ k คือ ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor)

2.2.3 ลมขีดสุด (Extreme Winds)

ปัจจัยลมกรรโชก (Gust Factor) u' สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$u' = 0.42 \ln(T_1 / T_2) \quad (2.16)$$

เมื่อ T_1 เป็นช่วงเวลาเฉลี่ยของอัตราเร็วลมเฉลี่ย (10 min ถึง 1 hr) และ

T_2 เป็นช่วงเวลาเฉลี่ยของลมกรรโชก (3 s ถึง 1 min)

อัตราเร็วลมในช่วงระยะเวลาสั้นๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.17

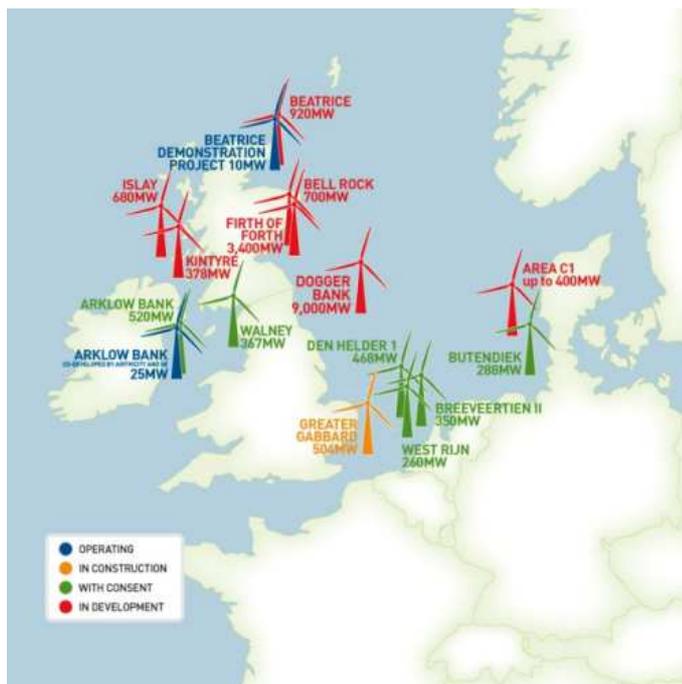
$$u = (u'I_t + 1)U \quad (2.17)$$

เมื่อ I_t คือ ความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_t = \sigma_u / U \quad (2.18)$$

โดยการอ้างอิงมาตรฐาน IEC 61400-1 อัตราเร็วลมขีดสุด (Extreme Wind Speed) จะเป็นค่าอัตราเร็วลมที่มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาเฉลี่ย t วินาที

ปัจจุบันมีการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลกันอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งทวีปยุโรปบริเวณทะเลเหนือ แสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับโครงการที่ได้ดำเนินการติดตั้งไปแล้วจนถึงล่าสุดมีข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาโครงการในประเทศสหรัฐอเมริกาชื่อ Cape Wind Farm (www.capewind.org)



รูปที่ 2.1 พื้นที่บริเวณทะเลเหนือสำหรับการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง

สำหรับการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลในทวีปเอเชียส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มประเทศมหาอำนาจทางด้านพลังงานลม ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น อินเดีย และเกาหลีใต้ โครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งในประเทศญี่ปุ่นได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 ซึ่งได้ดำเนินการติดตั้งกังหันลมขนาด 600 kW ระยะ 1 km ห่างจากฝั่งเมืองฮอกไกโด

ล่าสุดแผนการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งเมืองเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน มีกำลังการผลิตติดตั้ง 102 MW เพื่อผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบในปี ค.ศ. 2010 ก่อนงาน 2010 World Expo ปัจจุบันฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลดังกล่าวได้ดำเนินการติดตั้งเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว โดยกังหันลมผลิตไฟฟ้าจำนวน 34 ตัวๆ ละ 3 MW ติดตั้งใกล้สะพาน Dongbai เมืองเซี่ยงไฮ้ โดยมีระยะห่างจากฝั่งทะเล 6-7 km และระดับน้ำทะเลลึก 8-10 m กังหันลมมีระดับความสูง 90 m โดยโครงการดังกล่าวเป็นของบริษัท Sinovel Co., Ltd. ซึ่งการก่อสร้างเริ่มดำเนินการตั้งแต่ปลายปี ค.ศ. 2007 ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สถานภาพโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล

Country	Location	Distance to Shore (km)	Depth (m)	Power (MW)	No. of WTG
UK	Beatrice	25	45	5	2
UK	Blyth	0.8	6-11	2	2
UK	Barrow-in-Fumess	7	21-23	3	30
UK	Burbo	6.4	1-8	3.6	25
UK	North Hoyle	6	10-20	2	30
UK	Scroby Sands	2.3	4-8	2	30
UK	Kentish Flats	8.5	5	3	30
Ireland	Arklow Bank	10	2-3	3.6	7
Netherlands	Q7-WP	23	20-24	2	60
Netherlands	Egmond Ann Zee	10	19-22	3	36
Netherlands	Lely	0.75	5-10	0.5	4
Netherlands	Irene Vornnk	0.02	5	0.6	28
Germany	Ems-Enden	0.04	3	4.5	1
Germany	Breitling	0.5	2	2.5	1
Denmark	Ny Sted	10	5-9.5	2.3	72
Denmark	Samsø	3.5	20	2.3	10
Denmark	Fredenkshavan	0.2	4	3 and 2.3	1 and 2
Denmark	Ronland	0.2	1	2.3 and 2	4 and 4
Denmark	Horns Rev	14-20	6-12	2	80
Denmark	Middel Grunden	3	3-6	2	20
Denmark	Vindeby	1.5	3-5	0.45	11
Denmark	Tuno Knob	6	3-5	0.5	10
Sweden	Yttre Stengrund	5	6-10	2	5
Sweden	Utgrunden	8	7-10	1.425	7
Sweden	Bockstigen	3	6	0.5	5
Belgium	Off Zeebrugge	27-30	12-27	5	6
Finland	Ajos Harbor	<1	-	3	8



รูปที่ 2.2 ฟาร์มกังหันลมที่สะพาน Dongbai

2.3 หลักการของ Computational Fluid Dynamics (CFD)

โดยทั่วไปการอธิบายปรากฏการณ์การไหลในระบบทางวิศวกรรมสามารถทำได้ผ่านการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงวิเคราะห์ (Analytical Fluid Dynamics: AFD) ซึ่งเป็นวิธีการหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของสมการควบคุม (Governing Equation) ที่เป็นกฎทางฟิสิกส์ ได้แก่ กฎอนุรักษ์มวล กฎอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎอนุรักษ์พลังงาน โดยกฎต่างๆ เหล่านี้มักจะแสดงอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Partial Differential Equation) ซึ่งการหาผลเฉลยแม่นยำของระบบสมการดังกล่าวทำได้ยากหรือแทบจะทำได้เลยเนื่องจากสมบัติที่ไม่เชิงเส้น

ในทางปฏิบัติมักจะหาข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมผ่านการทดลองพลศาสตร์ของไหลเชิงทดลอง (Experimental Fluid Dynamics (EFD)) โดยการสร้างแบบจำลองและทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูงมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนตามที่ต้องการ นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทดสอบยังทำได้ยากอีกด้วย ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาวิธีการหาคำตอบโดยประมาณ (Approximate Solution) ของระบบสมการดังกล่าวโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาช่วยในการคำนวณ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) คือ เทคนิคในการสร้างแบบจำลองการไหลโดยใช้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและทำการปรับระบบสมการดังกล่าวให้เป็นระบบสมการทางพีชคณิต (Algebraic Equation System) เพื่อใช้ในการหาคำตอบโดยประมาณโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย

ในช่วงเริ่มต้นนั้น CFD ได้เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องเฉพาะในงานวิศวกรรมด้านการออกแบบอากาศยานและยานอวกาศ แต่ปัจจุบันมีการประยุกต์ CFD ในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์หลายๆ ด้าน เช่น การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ การวิเคราะห์การไหลของเลือดในหลอดเลือด และรวมถึงการประเมินศักยภาพของพลังงานลม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีภูมิประเทศซับซ้อน ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองของไหลเชิงเส้น Linear Flow Model นั้นไม่ถูกต้องเท่าที่ควร นอกจากนี้ CFD ยังมีประโยชน์อย่างมากในการจำลอง

สถานการณ์ที่ทำการทดลองได้ยากหรือไม่สามารถทำการทดลองจริงได้ เช่น การทดสอบอากาศยานที่ความเร็วสูงระดับ Hypersonic การจำลองการเกิดคลื่นสึนามิ การจำลองระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ซึ่งความถูกต้องของผลที่ได้ขึ้นอยู่กับความรู้ความเข้าใจของผู้ทำการวิเคราะห์

สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ได้แก่ กฎอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass Law) กฎอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum Law) และกฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy Law) ซึ่งจำลองปรากฏการณ์การไหลที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนหรือพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องสามารถทำได้โดยการหาคำตอบของสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ดังสมการที่ 2.19

$$-\left(\frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz}\right) = \frac{d\rho}{dt} \quad (2.19)$$

จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ แทนค่าด้วยการไหลแบบ 3 มิติ ได้ ดังสมการที่ 2.20

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} - fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \frac{Dv}{Dt} + fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \\ \frac{Dw}{Dt} + g &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w \end{aligned} \quad (2.20)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการนาเวียร์-สโตกส์ ให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 2.21

$$f - \nabla p + \mu \nabla^2 V = \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ f คือ แรงโน้มถ่วงที่กระทำกับมวลของไหลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
 ∇p คือ แรงเนื่องจากเกรเดียนต์ของความดันที่กระทำต่อพื้นผิวของปริมาตรควบคุมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
 $\mu \nabla^2 V$ คือ แรงเนื่องจากความหนืดที่กระทำต่อพื้นผิวของปริมาตรควบคุมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 $\frac{\partial V}{\partial t}$ คือ Unsteady Acceleration เป็นความเร่งที่ขึ้นกับเวลา
 $(V \cdot \nabla)V$ คือ Convective Acceleration เป็นความเร่งที่ไม่ขึ้นกับเวลา

การแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการหาผลเฉลยแม่นยำของสมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าว โดยคำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของสนามการไหล (Flow Field) อย่างไรก็ตามการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยตรงนั้นทำได้ยากเนื่องจากพจน์ $(V \cdot \nabla)V$ ที่มีสมบัติไม่เชิงเส้น

ดังนั้นในโปรแกรมสำเร็จรูปจะทำการปรับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยแนวความคิดของการแบ่ง (Discretization) โดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆ เพื่อที่จะสามารถใช้ฟังก์ชันชนิดต่างๆ สำหรับแทนลักษณะของการไหลผ่านเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆ นั้น ฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกแทนลงไปในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล ผสมเข้ากับกระบวนการทางคณิตศาสตร์บางอย่างเพื่อลดค่าผิดพลาด ก่อให้เกิดระบบสมการเชิงพีชคณิตขนาดใหญ่ที่จำเป็นต้องแก้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากคือวิธีผลต่างอันตะ (Finite Difference Method) และวิธีสมาชิกจำกัด (Finite Element Method)

วิธีผลต่างอันตะเป็นการใช้อนุกรมเทย์เลอร์เพื่อประมาณพจน์เชิงอนุพันธ์ที่ปรากฏอยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยค่าที่จุดต่อที่ตำแหน่งที่พิจารณาและจุดต่อข้างเคียง ก่อให้เกิดระบบสมการทางพีชคณิตที่จำเป็นต้องแก้ด้วยวิธีเชิงตัวเลข วิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการทำความเข้าใจ แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีลักษณะซับซ้อนได้โดยง่าย

วิธีสมาชิกจำกัดสามารถแบ่งรูปร่างที่ซับซ้อนออกเป็นชิ้นประกอบของสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าหรือแบบอื่นๆ ได้โดยง่าย ทำให้วิธีสมาชิกจำกัดได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่ประกอบไปด้วยรูปร่างที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม วิธีสมาชิกจำกัดนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนการประดิษฐ์สมการภายในที่ซับซ้อนกว่า เริ่มจากการสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในชิ้นประกอบ (Element Interpolation Function) การประยุกต์ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) ซึ่งประกอบด้วยการทำปริพันธ์ (Integration) ก่อให้เกิดสมการสมาชิกจำกัด (Finite Element Equation) สำหรับชิ้นประกอบนั้นๆ ก่อนนำสมการเหล่านี้มาประกอบกันเข้าขึ้นเป็นระบบสมการรวมขนาดใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องแก้โดยวิธีเชิงตัวเลขต่อไปเช่นกัน

อย่างไรก็ตามศักยภาพของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลโดยการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยการจำลองเชิงตัวเลขตรง (Direct Numerical Simulation, DNS) ได้ดีเฉพาะการไหลที่เป็นแบบราบเรียบ ในส่วนของกรไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent Model) ช่วยสำหรับการคำนวณ เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลสำหรับระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ ดังต่อไปนี้

1) Direct Numerical Simulation (DNS)

เป็นการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์โดยวิธีเชิงตัวเลขโดยตรงโดยไม่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent Model) เข้ามาช่วย ทำให้ต้องจำลองรูปแบบการไหลของกระแสมุขวนที่เกิดขึ้นทุกๆ ขนาด (Length Scale) อย่างไรก็ตามเนื่องจากความแตกต่างของขนาดของกระแสมุขวนที่เล็กที่สุดกับกระแสมุขวนที่ใหญ่ที่สุด ทำให้ต้องใช้ขนาดชิ้นประกอบขนาดเล็กในการคำนวณเพื่อให้ครอบคลุมกระแสมุขวนที่เกิดขึ้นทุกๆ ขนาด การคำนวณด้วยวิธีนี้จึงทำได้ยาก สิ้นเปลืองทรัพยากรของคอมพิวเตอร์และต้องใช้เวลาในการคำนวณยาวนาน

2) Large Eddy Simulation (LES)

เป็นการปรับปรุงเทคนิค DNS ให้ง่ายกับการคำนวณมากยิ่งขึ้น โดยจะทำการคำนวณสมการนาเวียร์-สโตกส์โดยตรงเฉพาะกระแสมุขวนที่มีขนาดใหญ่ และส่งผลต่อปรากฏการณ์ไหลมากเท่านั้น ในส่วนของกระแสมุขวนที่มีขนาดเล็กนั้น จะทำการจำลองโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน โดย

อาศัยข้อมูลทางสถิติของกระแสหมุนวนขนาดเล็กมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบ DNS

3) Raveraged Navier-Stokes (RANS)

จะทำการคำนวณความปั่นป่วนทั้งหมด โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน และปรับปรุงรูปแบบสมการนาเวียร์-สโตกส์เดิมโดยการแยกตัวแปรที่เกิดจากการไหล เช่น ความเร็ว u ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนเป็นค่าเฉลี่ย และส่วนที่สองเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.22

$$u(X,t) = \bar{u}(X) + u'(X,t) \quad (2.22)$$

สมการ Reynolds Averaged Navier-Stokes สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้แบบปั่นป่วน สามารถแสดงในรูปเวกเตอร์ได้ ดังสมการที่ 2.23

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 V + \nabla \cdot (\tau_{ij,turbulent}) = (V \cdot \nabla) V \quad (2.23)$$

โดย $\tau_{ij,turbulent}$ แทน ผลที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความปั่นป่วน (Specific Stress Tensor)

โดย $\tau_{ij,turbulent}$ บนโคออดิเนต x, y, z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(\tau_{ij,turbulent}) = - \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

ในการคำนวณระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน เช่น Model ซึ่งประกอบไปด้วย Transport Equation 2 สมการ โดยจะต้องหาคำตอบของสมการดังกล่าวไปพร้อมๆ กับการแก้สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม $k - \varepsilon$ โดยตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมาจะประกอบไปด้วย k คือ Turbulent Kinetic Energy และ ε คือ Turbulent Dissipation rate

4) Detached Eddy Simulation (DES)

เป็นการคำนวณโดยผสมผสานเทคนิค RANS และ LES เข้าด้วยกัน โดยช่วงขนาดความปั่นป่วนจะน้อยกว่าขนาดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้จะใช้เทคนิค RANS ในการหาคำตอบ และเมื่อขนาดของความปั่นป่วนสูงกว่าขนาดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้จะใช้เทคนิค LES ในการคำนวณผลเนื่องจากกระแสหมุนวนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ขนาดขึ้นประกอบที่ใช้ไม่จำเป็นต้องละเอียดมากเท่ากับวิธี LES ซึ่งจะช่วยให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงกว่าเมื่อใช้เทคนิค LES ในการหาคำตอบเพียงอย่างเดียว และให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องกว่าในกรณีที่ใช้ RANS ในการหาคำตอบเพียงอย่างเดียว

โดยทั่วไปขั้นตอนการทำงานของ CFD สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่

1) กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) เป็นขั้นตอนการกำหนดโดเมนการไหลที่ต้องการทำการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะเป็นพื้นผิวในกรณีที่เป็นกริดแบบ 2 มิติ หรือเป็นปริมาตรในกรณีที่เป็นกริดแบบ 3 มิติ และทำการแบ่งโดเมนดังกล่าวออกเป็นส่วนย่อย โดยอาจแบ่งเป็นตารางย่อยๆ (Mesh) หรือชิ้นประกอบเล็กๆ โดยเส้นตารางเหล่านี้จะตัดกันที่จุดต่อ (Node) ที่เป็นตำแหน่งที่เราจะคำนวณค่าผลลัพธ์ของการไหลอันได้แก่ ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ เป็นต้น การแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กหรือตารางที่มีความถี่มากเกินไป จะทำให้เพิ่มจำนวนจุดต่อที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่ามากขึ้นตามไปด้วย อันจะเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณและปริมาณหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมีคุณภาพสูงขึ้น ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องเป็นผู้ตัดสินใจถึงความเหมาะสมก่อนการคำนวณ แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) สำหรับปัญหานั้นตามลำดับ

2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) เป็นขั้นตอนในการคำนวณค่าตอบของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ถูกปรับปรุงให้อยู่ในระบบสมการทางพีชคณิตด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ตามเงื่อนไขข้อกำหนดที่ผู้วิเคราะห์กำหนดขึ้น

3) กระบวนการขั้นสุดท้าย (Post-processor) ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยความเร็วย่อยในทิศทางต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งใดๆ ในเมนการไหลนั้น ผลลัพธ์ที่คำนวณได้เหล่านี้โดยปกติจะมีจำนวนมากซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนจุดต่อและแสดงอยู่ในรูปของตัวเลข ซึ่งไม่สะดวกต่อการแปรข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น ดังนั้นโดยทั่วไปมักจะแสดงผลเหล่านี้ในรูปแบบกราฟิก เช่น การวาดเวกเตอร์ การวาดเส้นชั้นความสูง (contour line) หรือเส้นทางการเดินของอนุภาค

2.3.1 Reynolds number and Turbulence

ตัวเลข Reynolds ที่สูงบ่งบอกถึงการไหลแบบปั่นป่วน ความปั่นป่วนเนื่องจากผลกระทบของของไหล หรือความหนาแน่นของของไหลที่สเกลใหญ่

$$R_e = \frac{dU}{\nu} \quad (2.25)$$

เมื่อ R_e คือ ตัวเลข Reynolds

d คือ ลักษณะของความกว้าง

U คือ อัตราเร็วลม

ν คือ ความหนืด

2.3.2 Turbulent Kinetic Energy

WindSim ใช้การคำนวณของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ TI ต่อไปนี้เป็น การอธิบายโดยย่อ เกี่ยวกับสิ่งที่พลังงานจลน์ปั่นป่วนเป็น (Kinetic Energy: KE) สามารถคิดและการแบ่งออกเป็นสองส่วน (1) ที่เกี่ยวข้องกับค่าเฉลี่ยลม (Mean Kinetic Energy: MKE) และ (2) ที่เกี่ยวข้องกับลมปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy: TKE) นิยาม KE คือ

$$KE = \frac{1}{2} m U_i^2 \quad (2.26)$$

เมื่อ m คือ มวล
 U_i คือ อัตราเร็วลม

แบ่งได้ออกเป็นสองส่วนย่อยดังกล่าวข้างต้น (TKE และ MKE) สำหรับแต่ละทิศทาง (x, y, z) KE สามารถแสดงได้โดยสองสมการต่อไปนี้

$$\frac{MKE}{m} = \frac{1}{2} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2 + \bar{W}^2) \quad (2.27)$$

$$e = \frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \quad (2.28)$$

เมื่อ e คือ TKE ชั่วขณะต่อหน่วยมวล และ \bar{e} โดยเฉลี่ย

$$TKE = \frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) = \bar{e} \quad (2.29)$$

2.3.3 TKE Budget

Turbulent Kinetic Energy สามารถประมาณผ่าน TKE budget โดยที่ TKE budget ให้การผลิตจัดเก็บข้อมูลที่หักการเคลื่อนและการกระจายของ TKE การประมาณที่ได้รับรวมอยู่ที่นี่เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการประเมิน TKE สมมติว่าระบบปิดสอดคล้องกับสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = \underbrace{\frac{g}{\theta_v} \left(\overline{w'\theta_v'} \right)}_I - \underbrace{\overline{u'w'}}_{III} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \underbrace{\frac{\partial \bar{w'e}}{\partial z}}_{IV} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{w'p'}}{\partial z}}_V - \underbrace{\varepsilon}_{VI} \quad (2.30)$$

เมื่อ $Term I$ คือ หน่วยเก็บหรือแนวโน้ม ของ TKE

$Term II$ คือ ผลผลิตที่ขึ้นๆ ลงๆ หรือ เทอมที่ใช้แล้วหมดไป (ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของความร้อน)

$Term III$ คือ แรงเฉือนเชิงกล

$Term IV$ คือ เทอมการส่งผ่าน (โดยไม่หักการเคลื่อนที่แต่โดย กระแสความปั่นป่วน)

$Term V$ คือ ความดันที่สัมพันธ์กัน (TKE เป็นวิธีการส่งโดยการรบกวนความดัน)

Term VI คือ การทำให้กระจายตัวความหนืดของ *TKE* การเปลี่ยนแปลง เป็นความร้อน

2.3.4 $k-\varepsilon$ Turbulence Model

แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ เป็นสองสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน ทั่วไปในการประยุกต์ใช้ CFD ซึ่งรวมถึงสองสมการส่งผ่านที่เพิ่มขึ้น แบบจำลองความปั่นป่วนนี้เป็นวิธีการคำนวณความปั่นป่วน

WindSim ชั้นแรกของทั้งสองสมการอธิบายความปั่นป่วนพลังงานจลน์ (ซึ่งจะกำหนดพลังงานในความปั่นป่วน) ในขณะที่สมการที่สองอธิบายถึงการกระจายความปั่นป่วน (ซึ่งจะกำหนดขนาดของโครงสร้างที่ปั่นป่วน)

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.33)$$

เมื่อ $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ คือ ค่าคงที่ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4
 P_k คือ ความปั่นป่วนพลังงานจลน์ในเทอมการผลิต

$$P_k = v_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (2.34)$$

รูปแบบค่าคง $k-\varepsilon$ ใช้กับค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 รูปแบบค่าคงที่มาตรฐาน $k-\varepsilon$

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

สำหรับรูปแบบความปั่นป่วนที่ปรับเปลี่ยนไปประยุกต์ใช้ใน WindSim รูปแบบการใช้ $k-\varepsilon$ เดียวกันแต่ค่าคงที่ที่แสดงในตารางที่ 2.4 มีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงที่มาจาก “การปรับ” ค่าคงที่เหล่านี้ที่ดีกว่าการอธิบายที่ความปั่นป่วน

ตารางที่ 2.4 รูปแบบค่าคงที่ที่ปรับแต่ง $k-\varepsilon$

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0.0324	1.0	1.85	1.44	1.92

2.3.5 TKE และ TI

ความหนาแน่นความปั่นป่วนที่วัดโดยเครื่องวัดความเร็วลมชนิดถ้วยถูกกำหนดให้เป็น

$$TI = \frac{\sigma}{\mu_H} \quad (2.35)$$

เมื่อ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วลมที่วัด

μ_H คือ อัตราเร็วลม

TI ยังสามารถแสดงสำหรับทิศทางเดียว (x)

$$TI = \frac{\sigma}{\bar{\mu}} = \frac{\sqrt{\bar{u}'^2}}{\bar{u}} \approx \sqrt{\frac{2}{3} \frac{TKE}{\bar{u}^2}} \quad (2.36)$$

และสำหรับในแนวนอน TI (x และ y รวมกัน) นี้จะแสดงเป็น

$$TI = \frac{\sqrt{\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2}}{\bar{U}_H} \approx \sqrt{\frac{4}{3} \frac{TKE}{\bar{U}_H^2}} \quad (2.37)$$

โดยความสัมพันธ์นี้ TI ที่สามารถจะได้มาจาก TKE และส่วนประกอบของความเร็ว

2.3.6 Turbulence Intensity

ความเข้มข้นของความปั่นป่วน หรือหมายถึงระดับความปั่นป่วน

$$I \equiv \frac{u'}{U} \quad (2.38)$$

ที่อยู่ u' คือ รากของค่าเฉลี่ย จากตารางความผันผวนของความเร็วปั่นป่วนและ U เป็นความเร็วเฉลี่ย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

U สามารถคำนวณได้จากทั้งสาม ที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วส่วนประกอบ U_x, U_y และ U_z

$$U \equiv \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (2.39)$$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L. H. Juarez et al. (www.intechopen.com) ปรีทธรศน์องค์ความรู้เกี่ยวกับสนามลม 3 มิติ (3-D Wind Field) เหนือพื้นดินที่พิจารณา ซึ่งมีความสำคัญและมักจะถูกนำไปประยุกต์กับการแพร่กระจายและการกระจายของมลพิษในบรรยากาศ (Finardi et al., 2010; Sherman 1978) การจัดทำแผนที่ลมสำหรับการพัฒนาโครงการทุ่งกังหันลม (Castino et al., 2013) และอิทธิพลของลมที่มีต่อโครงสร้างของการกระจายตัวของไฟไหม้ (Potter&Butler, 2009) และการจำลองแบบคุณภาพอากาศ ในทางปฏิบัติสนามลมทางราบ (Horizontal Wind Field) มักจะมีการตรวจวัดเป็นจุดๆ และทำการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical Motion) ซึ่งอาจจะอาศัยหลายๆ วิธีหรือเทคนิคด้วยกันที่อาจจะมีความสลับซับซ้อนแตกต่างกันไป โดยปกติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง Prognostic และแบบจำลอง Diagnostic

แบบจำลอง Prognostic มักจะมีความสลับซับซ้อนสูงและเป็นแบบจำลองอุทกพลวัต (Hydrodynamic) ที่ขึ้นกับเวลา (Time Dependent) มีสมการควบคุมการไหลของอากาศรวมทั้งอิทธิพลทางด้านความร้อน (Thermal Effect) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและอันตรกิริยาความปั่นป่วน (Turbulent Interaction) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใกล้เคียงความเป็นจริง (Realistic) และมักจะมีค่าใช้จ่ายสูงในการรันจากคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงและทักษะในการดำเนินการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์

ในทางตรงกันข้ามกับแบบจำลอง Diagnostic ไม่ได้ต้องการการปริพันธ์สมการอุทกพลวัตแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Hydrodynamic Equations) แต่จะข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงสำหรับการสร้างสนามลม (Wind Field) ซึ่งลดข้อจำกัดทางด้านพลวัตและทางกายภาพ (Physical and Dynamical Constraints)

R.L. Lee et al., 1995 ทำการปรีทธรศน์แบบจำลอง Prognostic ต่างๆ ที่อาศัยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยพบว่าแบบจำลองหลายชนิดที่ได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานหลักการดังกล่าว ได้แก่ The Advanced Regional Prediction System (APRS), HOTMAC/RAPAD, Mesoscale Atmospheric System (MAS), MM4/MM5, The Navy Operational Regional Prediction System (NORAPS), RAMS, RAMS/HY-SPLIT, RAMS/LPDM และ RAMS/UAM-V

John C. Pace ได้ อาศัย แบบ บ จำ ล อ ง Prognostic ได้แก่ U.S. Navy's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS) สำหรับการสร้างข้อมูลลมเพื่อการจำลองการกระจายแบบเวลาปัจจุบัน (Real-Time)

R. M. Cox et al., 2003 ได้ใช้แบบจำลอง Diagnostic และแบบจำลอง Prognostic สำหรับการคำนวณการถ่ายเทในบรรยากาศ โดยแบบจำลอง Diagnostic อาศัยข้อมูลตรวจวัดสำหรับพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งและทำการประมาณค่าในช่วงโดยอาศัยกริด ซึ่งแบบจำลองนี้มักจะอาศัยสมการการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equation) แต่ในขณะเดียวกันแบบจำลอง Prognostic จะอาศัยชุดของสมการอุทกพลวัต (Hydrodynamic Equations) สำหรับการทำนายสนามลมและสนามความปั่นป่วน (Wind and Turbulence Fields)

Shawn G. Gallaher (2002) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แบบจำลอง Diagnostic อย่างง่ายที่มีความละเอียดสูง WOCSS ที่อาศัยข้อมูลจากกริดที่หยาบกว่าจากแบบจำลอง Prognostic COAMPS เพื่อสร้างข้อมูลระดับสเกลปานกลาง (Mesoscale) โดยวิธีการนี้จะใช้แบบจำลองพยากรณ์ COAMPS แบบ Nested Grid ที่ความละเอียด 81 km 27 km และ 9 km เพื่อสร้างข้อมูล

ลมที่ระดับความละเอียด 3 km ผลการศึกษาพบว่าการใช้แบบจำลอง COAMPS (9 km)/WOCSS สามารถสร้างข้อมูลที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงที่ระดับ 3 km

F. Alan et al., (1983) คำนวณแบบจำลอง Diagnostic และ Prognostic สำหรับ South Atlantic Bight โดยอาศัยสมการเริ่มต้นแบบ 3 มิติที่ขึ้นกับเวลา ระบบพิกัดซิกมา (Sigma Coordinate) ที่สามารถศึกษาปรากฏการณ์ระดับชั้น Ekman และระดับชั้นล่างได้ โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่มีแบบแผนแบบ implicit สำหรับแนวตั้งและเทคนิคการแยกเชิงเวลาเพื่อประสิทธิภาพในการคำนวณ

C. Brun et al., (2013) ศึกษาการควบแบบจำลอง Diagnostic และแบบจำลอง Prognostic สำหรับข้อมูลพลวัตเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของไฟฟ้า โดยการคำนวณแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน (Two Stage) ซึ่งเป็นแบบจำลองสนามลม (Wind Field Model) และแบบจำลองการพยากรณ์สภาพอากาศ (Weather Prediction Model) และศึกษาการควบแบบจำลองทั้งสองดังกล่าวสำหรับการประยุกต์กับสภาพภูมิประเทศแบบสลับซับซ้อน (Complex Terrain) และเงื่อนไขพลวัต (Dynamic Condition)

Gaudiosi (1999) ศึกษาการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลบริเวณทะเลเหนือซึ่งมีระดับความลึกของน้ำทะเลมากกว่า 10 m โดยได้เสนอการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล 10-20 km นอกประเทศเนเธอร์แลนด์และเดนมาร์ก โดยการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิต 1-2 MW โดยในการคัดเลือกพื้นที่สำหรับการติดตั้งได้พิจารณาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ผลกระทบทางสายตาและมลพิษทางเสียงด้วย

Manwell et al. (2002) ได้ทำการประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลสำหรับมลรัฐนิวอิงแลนด์ ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลในพื้นที่ดังกล่าว โดยในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย

- (1) การศึกษาข้อมูลลมที่มีอยู่แล้ว
- (2) การวัดลมนอกชายฝั่งทะเล
- (3) การหาความสัมพันธ์ (Correlation) และการทำนายข้อมูลลมระยะยาว (Prediction of Long-term Data) ณ พื้นที่นอกชายฝั่ง

โดยการอ้างอิงข้อมูลลมบนเกาะและการประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลโดยใช้ซอฟต์แวร์ MesoMap โดยในการศึกษาข้อมูลลมที่มีอยู่แล้วจากแหล่งข้อมูลดังต่อไปนี้

- (1) National Data Buoy Center
- (2) US Navy and Coast Guard Facilities
- (3) Mean Sea Surface Index
- (4) Ship Data
- (5) Surface and Upper Air Observation from National Weather Service-Affiliated Weather Stations
- (6) State Agencies
- (7) Re-Analysis Data
- (8) Maritime Research
- (9) Other Government and Private Sources

โดยได้พิจารณาการแจกแจงอัตราเร็วลม ความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) และการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลลมสถิติระยะยาว

Rogers et al. (2003) นำเสนอสถานภาพของการพัฒนาพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการนำเสนอกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบลอยน้ำ (Floating) ในทะเลสาบ Great Lakes โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาความสูงของคลื่นที่เป็นภาระกับกังหันลมด้วยโดยใช้ข้อมูลจากทุ่นลอย

นอกจากนี้ยังได้เสนอแนะถึงข้อจำกัดทางด้านกายภาพสำหรับการพัฒนาโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- (1) ระดับความลึกของน้ำทะเล (Water Depths)
- (2) ระยะห่างจากฝั่ง (Distance from Shore)
- (3) สัณฐานวิทยาของท้องทะเลและความชัน (Sea bed morphology and slope)
- (4) กระแสน้ำลึก (Underwater currents)
- (5) คลื่น (Waves)
- (6) สภาพอากาศและแผ่นน้ำแข็ง (Weather Issues and Floating Ices)

และข้อจำกัดทางด้านเทคนิคสำหรับการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลดังรายละเอียดต่อไปนี้

- (1) การเชื่อมต่อกับระบบกริด (Grid Connection Availability)
- (2) ท่าเรือสำหรับซ่อมบำรุงรักษาและการประกอบกังหันก่อนการติดตั้ง (Availability of Harbors for Maintenance Craft and Turbine Assembly)
- (3) สายไฟใต้น้ำ (Undersea Cables)
- (4) กิจกรรมทางการทหาร เช่น การซ้อมรบของกองทัพ

โดยมีข้อควรพิจารณาสำหรับมิติทางสังคมเพื่อลดความขัดแย้งสำหรับกิจกรรมอื่นๆ ดังนี้

- (1) ผลกระทบทางสายตา (Visual Impact)
- (2) โบราณสถานสำหรับแหล่งท่องเที่ยวทางทะเล (Shipwrecks and other underwater archeological sites)
- (3) เส้นทางคมนาคมทางน้ำ (Shipping lanes)
- (4) พื้นที่ประมง (Fishing Areas)
- (5) ผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตและสัตว์ปีก (Habitat Impact and Avian Issues)
- (6) ผลกระทบกับอากาศยาน (Civil Aviation Issues)
- (7) เขตอุทยานทางทะเล (Ocean Sanctuaries)

Pantaleo et al. (2005) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลโดยได้พิจารณาทั้งทางเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยได้พิจารณาพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการติดตั้งโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลม โดยได้ทำการพิจารณากังหันลมผลิตไฟฟ้าหลายๆ รุ่นเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ ได้แก่ Enercon E-40 E-66 Neg-Micon NM-48 NM-64 Vestas V-47 V-80 Largeway LW-58 LW-72 DeWind D6 DeWind D8 ผลการศึกษาพบว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมมากที่สุดได้แก่ รุ่นที่มีกำลังการผลิตติดตั้ง 2 MW ได้แก่ Vestas และ DeWind ซึ่งมี C.F. เท่ากับ ร้อยละ 35 และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 5.2-6.0

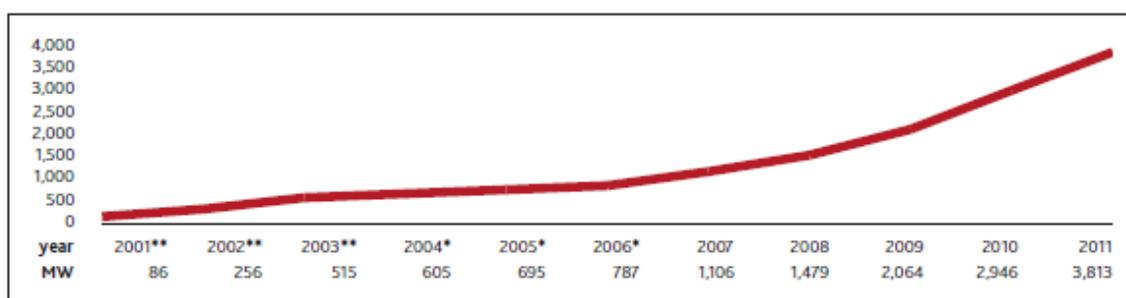
cEu/kWh สำหรับบริเวณ Ontario ประเทศแคนาดา โดยมีค่า IRR เท่ากับร้อยละ 27 ผลจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ยืนยันว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงการได้แก่ แหล่งทรัพยากรลม ระดับความลึกของทะเลและระยะห่างจากฝั่ง

Manwell et al. (2007) ได้ศึกษาเงื่อนไขสภาพแวดล้อม (External Conditions) สำหรับการออกแบบกังหันลมและการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเล โดยพิจารณาปัจจัยสภาพแวดล้อมหลักๆ ได้แก่ ลม (Wind) และคลื่น (Wave) นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงหลักเกณฑ์ในการออกแบบ แหล่งข้อมูลทรัพยากรลม เทคนิคการประมาณค่านอกช่วง การเก็บข้อมูลและแหล่งข้อมูลลมขีดสุด (Extreme Wind Condition) โดยพิจารณาถึงพายุต่างๆ เช่น พายุเฮอริเคน เป็นต้น

Smit et al. (2007) ได้ดำเนินการศึกษาการพัฒนาพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลของประเทศเดนมาร์กและประเทศสหราชอาณาจักร โดยพิจารณารูปแบบของการเรียนรู้โดยการทำ (Learning by Doing) และโดยการใช้ (Learning by Using) โดยกระบวนการเรียนรู้ทั้งหมดมักจะเกิดขึ้นเนื่องจากตัวขององค์กรเอง อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดหรืออุปสรรคทางด้านวัฒนธรรมและทางด้านเทคนิคอยู่บ้างของแต่ละประเทศ โดยนโยบายของประเทศเดนมาร์กก่อนข้างจะมีเสถียรภาพสูงทำให้การเรียนรู้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ

จากข้อมูลสถิติที่เก็บรวบรวมโดย Global Wind Energy Council (GWEC) พบว่าในปี พ.ศ. 2554 มีการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลในทวีปยุโรปรวมกำลังการผลิตติดตั้งทั้งสิ้น 3,813 MW โดยมีกำลังการผลิตติดตั้งในแต่ละปีและแนวโน้มแสดงดังรูปที่ 2.3

GWEC ได้รายงานเพิ่มเติมอีกว่าในปี พ.ศ. 2554 มีการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลรวมกำลังการผลิตติดตั้งทั้งสิ้น 965.6 MW แสดงดังตารางที่ 2.5 โดยประเทศอังกฤษมีกำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลสูงสุด 752.4 เมกกะวัตต์



**EU15 *EU25

Source: GWEC

รูปที่ 2.3 กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลในทวีปยุโรปจนกระทั่งปี พ.ศ. 2554 (ที่มาข้อมูล: GWEC)

ตารางที่ 2.5 กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลในปี พ.ศ. 2554 และกำลังการผลิตติดตั้งรวมจนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2554 จำแนกตามประเทศต่างๆ

Country	2011 (MW)	Cumulative Total (MW)
Belgium	0	195.0
Denmark	3.6	857.28
Finland	0	26.3
Germany	108.3	200.3
Ireland	0	25.2
Netherlands	0	246.8
Norway	0	2.3
Portugal	2.0	2.0
Sweden	0	163.7
UK	752.4	2093.7
China	99.3	258.4
Japan	0	25.0
Total	965.6	4,096

โดยมีตำแหน่งของฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลที่กำลังดำเนินการอยู่ในทวีปยุโรปที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งใหญ่สุด 22 ใน 25 อันดับแรกแสดงดังรูปที่ 2.4 ข้อมูล ณ เดือนกุมภาพันธ์ 2555 ฟาร์มกังหันลม Walney ของประเทศอังกฤษเป็นฟาร์มกังหันลมที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งที่ใหญ่ที่สุดในโลก โดยมีกำลังการผลิตติดตั้ง 367 MW ตามด้วยโครงการ Thanet ที่มีกำลังการผลิตติดตั้ง 300 MW ในประเทศอังกฤษ โดยที่โครงการ London Array เป็นโครงการที่อยู่ในระหว่างการก่อสร้างที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งสูงสุด 630 MW แต่อาจจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับโครงการฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลที่กำลังพัฒนา เช่น โครงการ Dogger Bank 9,000 MW Norfolk Bank 7,200 MW และ Irish Sea 4,200 MW



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของฟาร์มกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลขนาดใหญ่ที่สุด
22 ใน 25 อันดับแรก (ที่มาข้อมูล: Wikipedia)

Levitt et al. (2011) รายงานว่าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลจะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในกลุ่มประเทศยุโรปในปี ค.ศ. 2010 ซึ่งจะมีการติดตั้งฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลมากกว่า 1 GW โดยมีการลงทุนมากกว่า 4 พันล้านเหรียญสหรัฐ

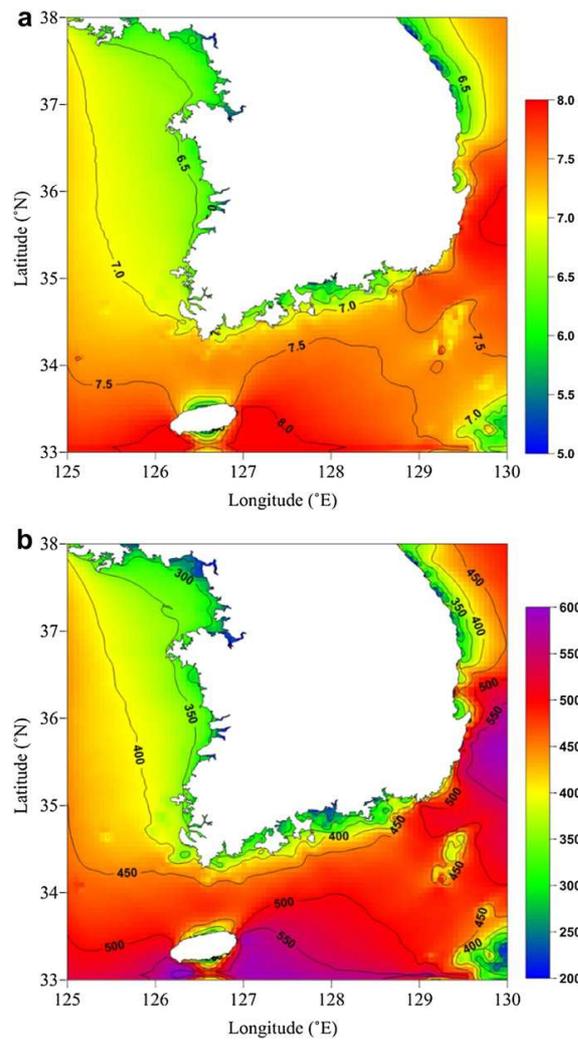
G. Li (2000) ศึกษาความเป็นไปได้ของฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลสำหรับประเทศฮ่องกง โดยเป็นการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้น ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวได้อาศัยข้อมูลลมตรวจวัดปี ค.ศ. 1998 จากเกาะในประเทศฮ่องกง ผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีที่ระดับความสูง 74.8 m มีค่าเท่ากับ 6.6 m/s โดยมีความหนาแน่นกำลังลมเท่ากับ 310 W/m^2 โดยจำลองการติดตั้งกังหันลมขนาด 1.65 MW ลงบนพื้นที่ในทะเลทั้งหมดของเกาะฮ่องกง พบว่าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลดังกล่าวสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 25 TWh ซึ่งเท่ากับร้อยละ 72 ของการบริโภคไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1998 ของทั้งประเทศ โดยภายใต้ต้นทุนและผลตอบแทนจากการผลิตไฟฟ้าจำหน่ายเชิงพาณิชย์ พบว่าโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลของประเทศฮ่องกงมีความเป็นไปได้ทั้งทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์

D. Karamais et al. (2011) ประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลไอโอเนียนซึ่งเป็นเขตทะเลระหว่างประเทศอิตาลีและประเทศกรีซ โดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดลมที่ระดับความสูง 10 m พบว่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีมีค่าเท่ากับ 5.7 m/s และ 5.8 m/s โดยมีความหนาแน่นกำลังลมเท่ากับ 250 W/m^2 โดยพบว่าที่ระดับความเร็วมดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 48 สำหรับกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลที่มีระดับความสูงของ

ศูนย์กลางส่วนหมุน (Hub Height) ที่ 100 m โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าโครงการอายุ 20 ปี จะมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ในช่วง 6.5-8.7 ปี และสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 140 kt CO₂-eq สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 5 MW

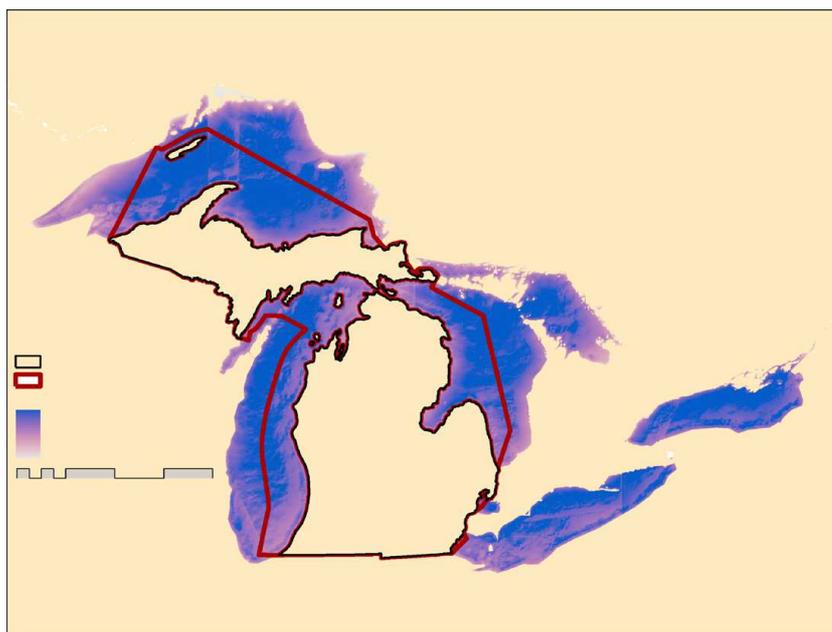
จากการที่ร้อยละ 70 ของคาบสมุทรเกาหลีเป็นพื้นที่ภูเขาสูง ทำให้การพัฒนาฟาร์มกังหันลมบนฝั่งของประเทศเกาหลีมีอุปสรรคเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์พื้นที่บนฝั่ง รัฐบาลเกาหลีจึงมีนโยบายที่จะศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล โดยให้สถาบันวิจัย Korea Electric Power Corporation-Research Institute ทำการศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการก่อสร้างฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลแห่งแรกในประเทศเกาหลีรวมทั้งการประเมินศักยภาพของพลังงานลมรอบๆ พื้นที่คาบสมุทรเกาหลีด้วย โดยในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นได้อาศัยข้อมูลทูลอยในทะเลจำนวน 5 สถานี ซึ่งได้ทำการเก็บบันทึกข้อมูลเป็นระยะเวลา 12 ปี และได้อาศัยข้อมูลดาวเทียม QuikSCAT (Quick Scatterometer) เป็นระยะเวลา 9 ปี รวมทั้งแผนที่ลมที่อาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาหรือข้อมูลตรวจวัดระยะเวลา 4 ปี โดยมีผลการวิจัยเกี่ยวกับแผนที่ลมแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีความแยกชัดหรือความละเอียด 3 km ข้อมูลจากแผนที่ลมและดาวเทียมสอดคล้องตรงกันว่าอัตราเร็วลมมีค่าอยู่ในช่วง 6-7 m/s ทางด้านฝั่งทะเลตะวันตกและมีค่าอยู่ในช่วง 7-8 m/s บริเวณทะเลทิศใต้และทิศตะวันออก ผลการวิจัยยังพบอีกว่าข้อมูลจากแผนที่ลมและข้อมูลจากการตรวจวัดโดยทูลอยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 1.8-16.3

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาโครงการฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลประเทศสหรัฐอเมริกาทางตอนใต้ของรัฐ New England โดยในการพัฒนาโครงการดังกล่าวมีขอบเขตของงาน 4 ด้านด้วยกัน ดังนี้ (1) การทบทวนข้อมูลลมนอกชายฝั่งทะเลที่มีอยู่ (2) การดำเนินการตรวจวัดลมนอกชายฝั่งทะเล (3) การศึกษาสหสัมพันธ์ (Correlation) และการพยากรณ์ (Prediction) กับข้อมูลลมสถิติระยะยาวที่มีการตรวจวัดบนเกาะ และ (4) การประเมินแหล่งทรัพยากรลมบริเวณชายฝั่งทะเลโดยใช้ซอฟต์แวร์ MesoMap ซึ่งเป็นแบบจำลอง Mesoscale Weather Modeling System ที่พัฒนาโดย AWS TrueWind Solutions โดยระบบ MesoMap อาศัยระบบ Mesoscale Atmospheric Simulation System (MASS) ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 และมีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์อื่นๆ เช่น Eta และ MM5 แบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วยสมการกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน รวมทั้งวิถุภาคของความชื้น พลังงานเนื่องจากความปั่นป่วนที่ได้พิจารณาความหนืด (Viscosity) เสถียรภาพเชิงความร้อน (Thermal Stability) และแรงเฉือนลม (Wind Shear)



รูปที่ 2.5 แผนที่ลมความละเอียด 3 km นอกชายฝั่งทะเลประเทศเกาหลี (รูป a)
และความหนาแน่นกำลังลม (รูป b)

นอกจากนี้ยังได้มีความสนใจที่จะศึกษาศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลบริเวณรัฐแถบ Great Lakes ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นแนวทางในการพัฒนาโครงการบริเวณอื่นๆ ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้โดยตรงเนื่องจากความแตกต่างของบริบทเชิงพื้นที่ โดยได้มีการพัฒนากรอบการทำงานสำหรับการประเมินเบื้องต้นของศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเล โดยอาศัยข้อมูลระดับความลึกของทะเลสาบและทรัพยากรลมในการจำลองสถานการณ์ นอกจากนี้แนวคิดการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลยังมีข้อดีในกรณีที่มีการขนส่งกังหันลมขนาดใหญ่และมีราคาแพงดำเนินการได้ง่ายกว่าสำหรับการติดตั้งในทะเลเมื่ออุปกรณ์มาจากต่างประเทศ จากการพัฒนาแผนที่ลมโดย AWS TrueWind แสดงดังรูปที่ 2.6 บริเวณมลรัฐมิชิแกน ประกอบกับข้อมูล LiDAR ระยะเวลา 1 ปี พบว่าอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 150 m มีค่าประมาณ 8.4 m/s เหนือพื้นผิวทะเลสาบ



รูปที่ 2.6 แผนที่ลมเหนือความละเอียด 1 km บริเวณ Great Lakes จาก AWS TrueWind

GIS Based Cost Model และ GIS Based Energy Model ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการคัดเลือกพื้นที่ (Site Selection) ในกลุ่มประเทศยุโรป ผลการวิจัยพบว่าการใช้ Cost Model สามารถจำลองด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์ของฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลและสามารถนำไปประยุกต์กับ GIS เพื่อประเมินทรัพยากรลมในทะเลของกลุ่มประเทศยุโรปบริเวณทะเลเหนือ ผลการวิจัยยังพบอีกว่าการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลสามารถใช้เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 1.5 MW ณ ตำแหน่งลมดีที่สุดโดยไม่มีการเสียค่าปรับ (Economic Penalty)

ปี ค.ศ. 2010 เป็นปีสำคัญสำหรับการพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน โดยปีดังกล่าวฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลแห่งแรกได้ถูกเชื่อมต่อกับระบบกริดและเป็นปีที่ได้มีการประกาศสนับสนุนอย่างเข้มแข็งจากรัฐบาลกลาง จากการศึกษาโดย China Meteorological Administration ในช่วงต้นทศวรรษที่ 21 บ่งชี้ว่าการผลิตไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลที่มีระดับน้ำทะเลลึกไม่เกิน 20 m มีกำลังการผลิตติดตั้งประมาณ 750 GW โดย UNEP ร่วมมือกับ NREL ทำการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลของประเทศจีนพบว่ามีกำลังการผลิตประมาณ 600 GW โดยมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเงินลงทุน (Capital Expenditure: CAPEX) ของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลสูงกว่าบนฝั่งประมาณ 1.5-2 เท่า ซึ่งได้มีการวางแผนเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลในบริเวณจังหวัดที่อยู่ติดทะเลทางด้านตะวันออกของประเทศจีนประมาณ 17,600 MW