



# 永續城市環境策略與風電發展潛能

國立臺北科技大學機械工程系助理教授 / 阮于軒  
國立臺北科技大學能源與冷凍空調工程系特聘教授兼系主任 / 楊安石

關鍵字：城市風能、永續發展、高層建築、密集城市

## 摘要

近年來全球再生能源之趨勢，風能作為其重點發展之一，城市推行永續環境策略也開始從建築規劃與設計層面考慮結合風力發電機之設置。而現今城市化地區建築群朝高密度與高層化發展，建築高度、城市配置與建築體量體構型設計皆能影響周圍微氣候風環境，故環境風能分析對城市風能應用極具重要性。本文探討永續城市環境風電發展潛能，針對密集城市高層建築地區進行風電評估，探討細部風場特性與查明具有風能潛力區域，在低風速或風速較不穩定之城市區域能有效利用低切入風速發電，並分析適合安裝微小型風力發電機的位置，以實現城市風能可開發蘊藏量的最大化。

## 一、前言

距離聯合國2030年需達成17項永續發展目標（Sustainable development goals, SDGs），已進入倒數十年，當中目標七SDG7明訂「確保所有的人都能取得可負擔、可靠的、永續的，以及現代的能源」，其一重點方法即是再生能源的廣泛使用。臺灣可再生能源占最終能源消費總量的份額雖已逐年增加至2021年的5.94%，其中太陽光電占比約2.75%，而風力發電占比約0.68%。然而面對實現政府「2025再生能源發電占比20%」的目標，仍急需更快的增長。近年來我國積極發展離岸風電，至2021年底已完成269MW建置。而陸上風電則因占地面積廣且易改變地貌、惱人噪音大，對環境生態負面影響而發展受限。因此能在既有設備發展之



城市風電正開始受到世界各城市新能源開發的青睞，其對土地較無獨占性，故可降低對環境與占地的疑慮，且能避免長距離電力輸送的耗損，與其他潔淨能源搭配能發展更多用途。

城市風能所具備良好開發潛力，使得環境風能分析對風能應用極具重要性。在城市中，高層建築的建築型態與風能利用密切相關，密集城市（Compact city）風場因空氣流動過程中與建築物量體群結構交互影響而變得複雜而形成獨特之風場分佈。臺灣地狹人稠，除開發偏遠沿海地區之大型風機之外，城市建築環境中亦具將風力發電與高層建築群體結合之可能性以最大化廣泛發展臺灣城市地區之風力發電。在永續發展的趨勢下，透過高層建築群體配置和高層建築本身設計，如何與環境結合有效運用風場，成為都市發展風力發電之重要議題。

## 二、研究背景

過去十年中，氣候變遷已成為造成我們環境日益嚴峻的關鍵問題。據 NASA 研究顯示，2020年的全球平均地表溫度是有記錄以來最熱的一年[1]。導致全球暖化的溫室氣體排放量約佔75%，同時消耗世界上三分之二的能源。城市作為氣候變遷的主因，同時也是人類社會受影響最大的區域，城市熱島效應和空氣污染透過快速的城市化更加劇這過程。因此，永續城市發展成為應對氣候變遷

解決方案的必須策略，透過城市環境設計方法將問題轉化為機遇，從而對我們微氣候環境產生積極影響。

隨著風電事業的飛速發展，風電場開發選址已成為一個重要的研究課題。近幾年風力發電技術純熟，被普遍用於具有良好風環境之陸域或大型離岸風場，然而，離岸風電礙於距離人口密集市區較遠，其電網傳輸電力損失問題大與大型風力發電機的安裝設置成本高。故風力發電機在城市環境中的使用也引起關注，整合建築與再生能源之應用[2-4]。城市環境中，氣流經過建築物可局部加速提高風速和能源產量，然而由於建築環境地形粗糙度的複雜性，使城市地區的風環境難以預測分析。當城市皆往高密度、高層發展，城市環境中建築物密集，高層建築的配置與結構形狀、街廓狹谷佈局、各地風力條件的不同，加以建築群體間的相互干擾造成氣流紊亂、風場非定向、不穩定特性，影響風強度及風能密度等分佈，尤其建築物屋頂、邊緣、垂直牆面等位置風速改變明顯。同時也因城市地區高樓林立和空間限制，局部風場甚或完全被上游結構體遮蔽而呈現幾乎無風狀態。目前城市環境的風能利用主要分為建築整合風機（Building integrated wind turbines, BIWT）或在現有建築上安裝小型或微型風力發電機組，利用環境自然資源考慮風機與建築設計直接結合，在不破壞環境基本生態平衡條件下達到永續發展建築。一般來說，小型或微型風力

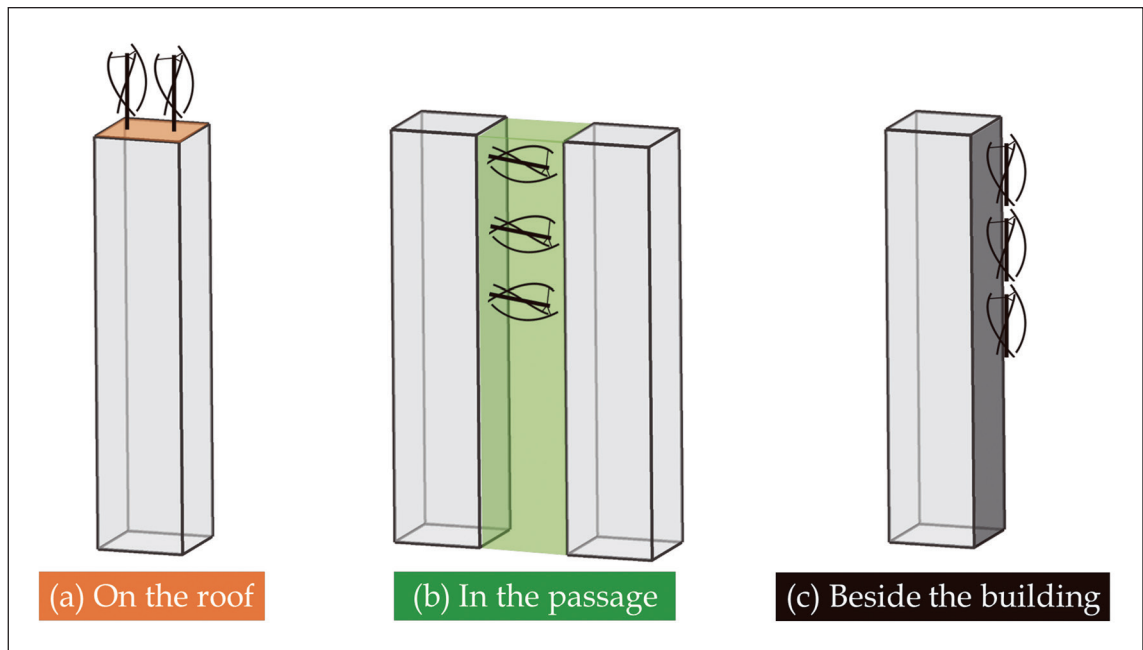


圖 1 高層建築整合風力發電機組可能安裝之討論區域

發電機組最可行設置於建築上之區域如圖1所示，包括：（1）建築物屋頂上方、（2）建築物之間的通道、和（3）建築物邊緣。以建築物之間的通道來說，密集城市中的高層建築高度（ $H$ ）和其相鄰建築之通道寬（ $W$ ）之高寬比值（ $H/W$ ）非常小易造成狹管效應，又稱峽谷效應或頸束效應，為氣流通過狹窄街谷時風速加快速的物理現象，使風能密度隨之增加[5, 6]。因此，高精度數值模擬之城市風資源評估對提供有效風力發電機潛在安裝地點等細節信息具有其必要性[7, 8]。

城市風能資源的研究方法包含現場實地

量測[9, 10]、縮尺風洞實驗[11, 12]、以及計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）進行數值模擬[13-15]。目前對風能資源評估的方法仍存在許多挑戰，例如：

1. 由於風是一種氣候現象，其預測值易有波動，且具有不確定性。
2. 基於長時間對於氣象條件記錄，風能資源評估可能會因為依據平均風速而低估實際的風能密度。
3. 風速可能會受到地形與建築構型的影響，造成實驗量測與實際風機安裝位置會預期有約±10%之誤差。
4. 風能資源評估會需要與風速分布、風向與



紊流強度相關的數據以確立或調整風機安裝位置與高度。

5. 無論是實驗測量位置、設備精確度，還是量測儀器之設置方位皆可以影響量測數據與驗證結果。

CFD模擬作為早期城市設計的有效工具，經濟實惠且適用於城市環境設計的有效分析，可控制初始和邊界條件以獲得完整計算域中的流場數據和相關參數，並可進行不同城市形態參數來定量評估城市規劃中不同建築佈局的設計策略優劣。除了要考慮風機裝設位置擁有最高平均風速外，風向、氣流

的穩定性與建築風場的交互作用都是必須納入考量的，避免高強度紊流導致風機渦輪葉片耗損而降低性能、提高維修成本，除此之外，也應當避開低風速且風電潛能較低的區域，以排除浪費資源的可能性。城市風能潛力可通過改變城市形態參數來顯著提高，例如城市佈局[16-18]、城市密度[19-21]、建築幾何形狀[22-24]、以及建築物角落修改[25-27]等如圖2密集高層建築群中所示，若在早期城市規劃中能採取有效的城市設計策略作為氣候控制解決方案，便提早優化風能條件，促進城市風能發電的永續發展。

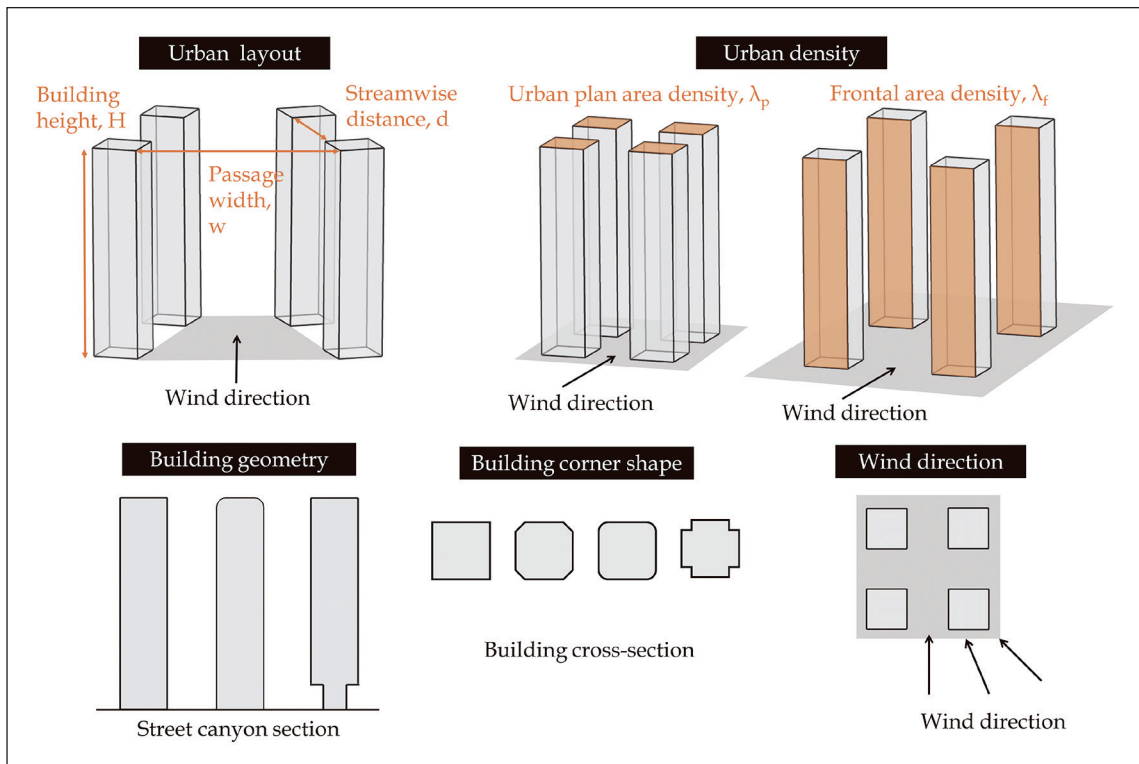


圖 2 高層建築群之城市形態參數

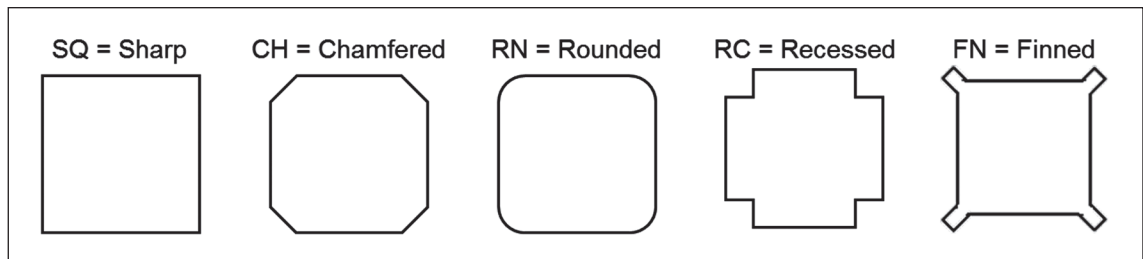


圖 3 高層建築截面之不同建築角隅形狀修正

本文透過CFD模擬了解不同城市形態參數對高層建築周圍城市風力發電的影響，將重點關注城市風能潛力和高層建築周圍相關的複雜氣流現象，應用於理想密集高層建築區域和真實高密度建築群案例。CFD 模擬依據城市建築群體與環境狀況擬真建置三維立體數值分析模型，用以決定計算域內風場速度、壓力等。本研究之基本假設基於穩態、三維、不可壓縮紊流穿越建築結構，並以連續、動量、紊流動能與紊流動能消散率方程式，採用計算流體力學軟體ANSYS Fluent®求解速度與壓力場。理想城市部分採用高精度CFD模擬來研究不同形態參數對可能的風力發電機安裝區域的風能潛力的影響；真實高層城市地區的城市風能潛力CFD模擬則以香港中環地區為案例，進行風能潛力的高精度CFD模擬以評估香港風資源的應用。

### 三、透過高層建築設計提高密集城市風力發電潛力

高層建築的建築型態與風能利用密切相

關，密集城市風場因空氣流動過程中與建築物量體群結構交互影響而變得複雜，形成獨特之風場分佈。城市風場結構受高層建築本身量體構型而影響其氣流之速度大小、方向及紊流強度，當氣流穿越建築物時繞過建物經兩側的自由流區形成分流風，其中又以流線型建築物容易引導氣流而加大風速。當氣流通過建築邊緣，也可藉由改變不同建築角隅（Corner）構型修正（如圖3）作邊緣導角優化設計，風速會因建物形狀改變加速，產生亂流、上升流及下降流等，故可藉由優化邊緣稜線處使之滑順以增加風速，此效應稱為寬德效應（Coanda Effect），亦稱附壁作用或康達效應。氣流離開本來的運動方向，改為隨著凸出的物體表面摩擦時，流體的流速會減慢。只要物體表面的曲率不是很大，依據流體力學中的伯努利原理，流速的減緩會導致流體被吸附在物體的表面上流動。實際上利用此效應可誘導空氣氣流在高層建築邊緣和角落表面提升氣流速度，以實現城市風能。

在傳統的高層建築設計及城市規劃的實



踐中，一般建築師常缺乏對城市風能發展的關注，較少考慮高層建築修正其角隅形狀以提升風力的概念。本節探討理想城市中 $2 \times 2$ 之四棟建築陣列，針對密集街廓配置之影響設計因子 - 高層建築角隅構型修正，討論其對城市風能利用之影響。在城市風環境的評估過程中，考慮當今城市地區高密度化建築物開發，導致風穿越建築群體間因相互干擾造成氣流紊亂之非定向風場，透過高精度CFD模擬搭配縮尺風洞實驗驗證，進行理想密集城市風場之參數化設計分析，以評估其氣動優化提高其潛在風能。案例亮點在於考量高層建築型態和其不同建築邊緣角隅構型設計，包括尖角、導角與圓角，將高層建築本身配合密集城市街廓配置設計進而增大街廓環境風速以提升風力發電潛力，並提出在高層建築上有利集風最大化之安裝位置。研究結果顯示，當氣流通過高層建築間空隙時，導角與圓角構型發生流動膨脹並使氣流在角隅間風速加速，如圖4。

城市風電潛能評估指標除風速外還包括風能密度及紊流強度，尤其針對風機適宜安裝之三潛在位置：現有建築物屋頂、間距間、與側邊垂直牆尤為重要，除選定高風能密度區域外，更需配合考量選擇紊流強度較低之位置，尤其城市環境中紊流風易受建築構型與地形影響而造成高紊流強度區域，導致風力渦輪機旋轉葉片受過大疲勞應力而損壞，故評估應集中選定高風能密度且低紊流強度區域，以提供風機穩定運轉發電條件。圖5圓角角隅構型除了藉由氣動優化角隅邊緣使滑順增加風速能提高風能密度，亦更為降低其紊流強度。針對潛在風機安裝位置，顯示建築垂直面之建築間距間以高層建築一半高度處為最佳安裝區域，而側邊垂直牆部分以下游建築之後圓角角隅邊緣一側為最佳安裝區域。同時，增加圓角角隅構型之圓角半徑長度可增大風能密度及降低紊流強度[7, 28, 29]。

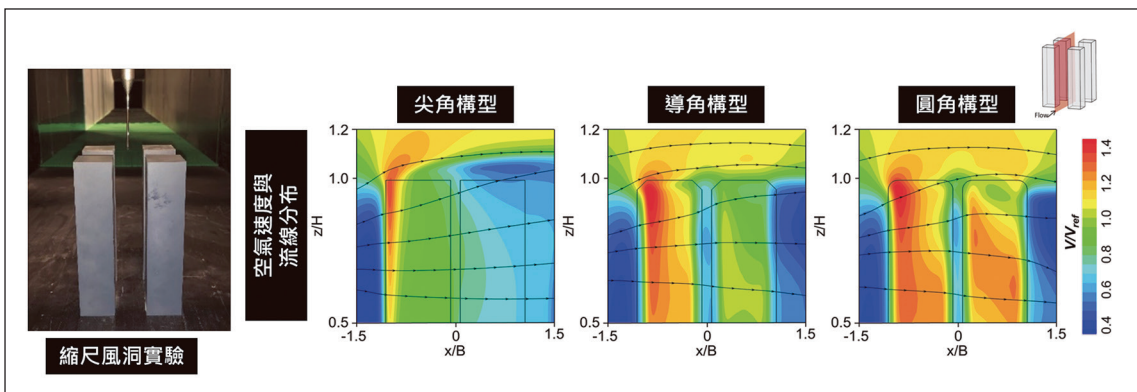


圖 4 縮尺風洞實驗與 CFD 數值模擬結果之空氣速度與流線分布

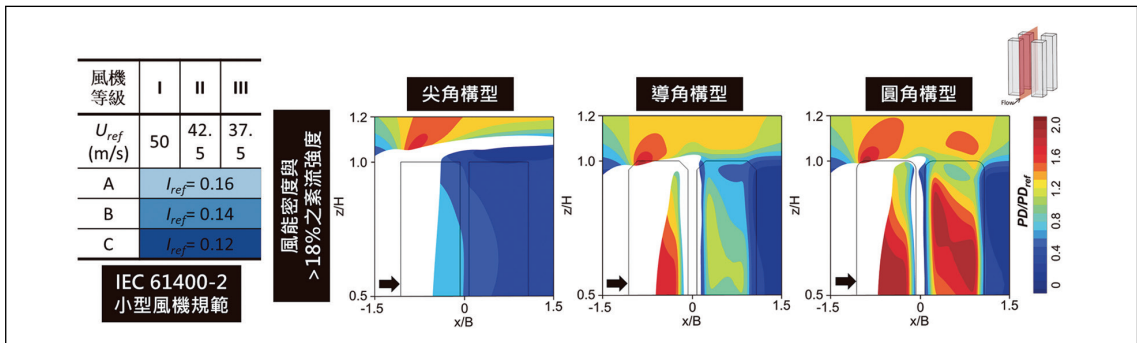


圖 5 IEC 61400-2 小型風機規範與 CFD 數值模擬結果之風能密度（紊流強度大於 18% 以白色區塊呈現）

#### 四、真實密集城市環境之風能評估

將高層建築本身配合密集城市街廓配置設計增大街廓環境風速，因此在城市規劃和高層建物設計時，除提出在高層建築上有利於集風的風力發電機的安裝位置外，配合城市街廓佈局來選擇合適位置建置風機以充分利用城市風能，對於城市永續發展和近零能耗建築實現有重大意義。如何通過合理設計，有效增加建築環境中的風資源，分析風能密度與紊流強度分佈，從建築設計的角度

探討適合於風力發電高層建築的形態下，提供建築師理論參考進而達到潛在風能利用最大化。為探討真實高都市化區域的風能資源，本文選定以擁有世界最密集高樓大廈之香港中環為研究案例，針對以人口稠密且高層建築密集的城市進行風能發電潛力的評估。本研究探討了香港中環的城市風能發展，並以全港第二高415公尺的第二期國際金融中心（International Finance Centre, IFC）為中心，如圖6所示建置半徑一公里內建築物的三維立體擬真數值模型。

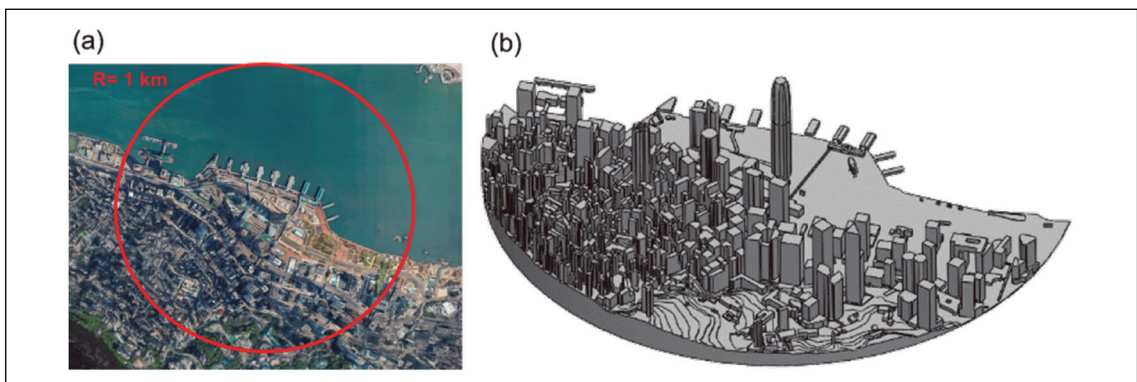


圖 6 研究範圍香港中環地區之 (a) Google Map 實景圖與 (b) 數值模型

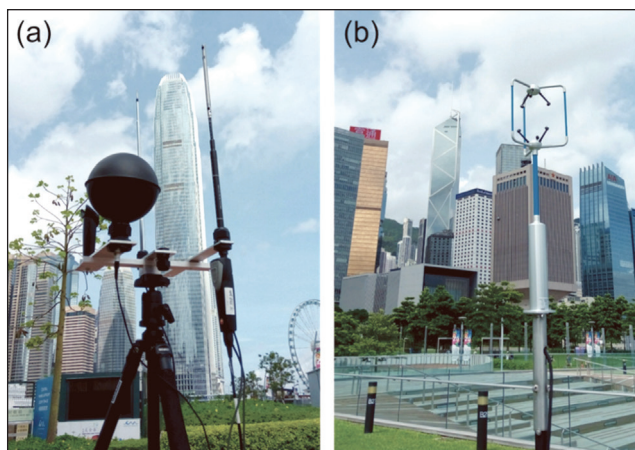


圖 7 (a) Testo 0635 1050 熱球式風速計與 (b) WindMaster 三軸風速風向計

表 1 實測儀器基本資料

儀器名稱		儀器功能
Testo 系列	熱球式風速計 Testo 0635 1050	主要用來感測風速大小，其量測範圍為 0~10 m/s，量測精度為 ±0.03 m/s。
	多功能測量儀 Testo 480	用於連接各感測器與主機，紀錄量測數據，可以測量溫度、濕度、風速、壓力等多種參數與長期監測。
WindMaster 三軸風速風向計		整套風速風向計系統安裝包含：風速風向計、資料擷取設備、電源供應模組以及安裝基座系統可量測之風速範圍可至 0 至 45 m/s，量測解析度為 0.001 m/s，量測精度 <1.5% RMS，而風向可量測範圍為 0 至 359.9°，量測解析度為 0.1°，量測精度為 ±2。

以CFD模擬計算細部風環境，並透過現場量測夏、冬兩季節之風速大小、風向與紊流強度，於選定範圍採用Testo系列微氣候量測儀器與WindMaster三軸超音波風速風向計（如圖7），其儀器功能、量測範圍、與精準度如表1所示。CFD模擬代入當地氣候數據做為入口邊界條件，其以實驗數據驗證CFD模擬結果證明其預測準確性，再針對不同高度與區域進行風能密度與紊流強度的分析，以評估研究區域的風能潛勢，由整體風場特性

（包含：風速、風能密度與紊流強度）趨勢來觀察為評估風能可行性，研究每棟建築物近屋頂水平高度的風能密度與紊流強度之空間分布，決定適合安裝小型風機且能供應穩定風電輸出的位置。

整體來說由圖8可知背風測的風能密度相對較低，且紊流強度高於18%，不符合IEC 61400-2安裝風機規範。隨著氣流通過建築物周圍，所產生的風速可換算成風能輸出；



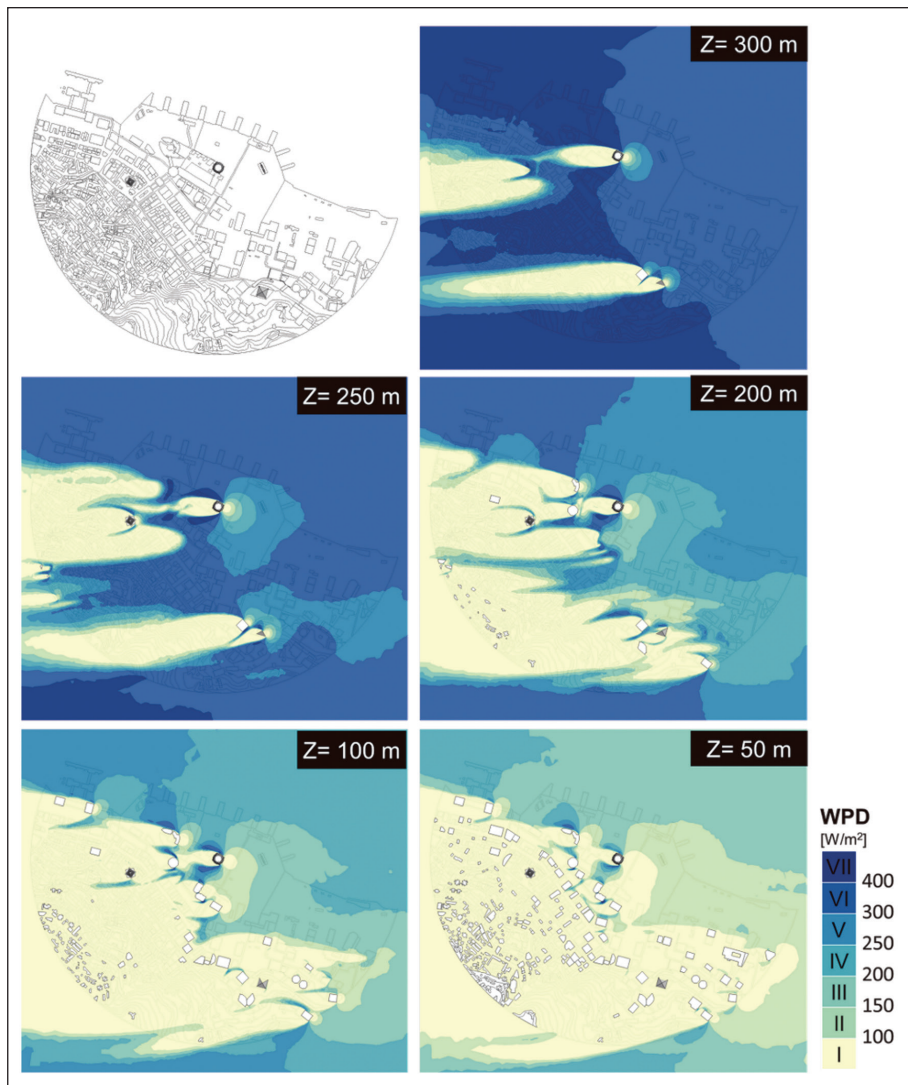


圖 8 數值模擬全區不同高度之風能密度分布圖

除此之外，盛行風流經建築屋頂會因受到屋角擴展（Corner expansion）加速作用的影響而增加風能密度，而屋頂角隅處也會有相對較低的紊流強度且都滿足適合安裝風機的標準。根據尾流與角隅風流擴展作用，可從冬

季模擬結果評估有機會安裝風機的位置能否被風能所應用。

針對所建置之數值模型範圍內具有較高風能潛力之單棟高層建築作細部討論，其城

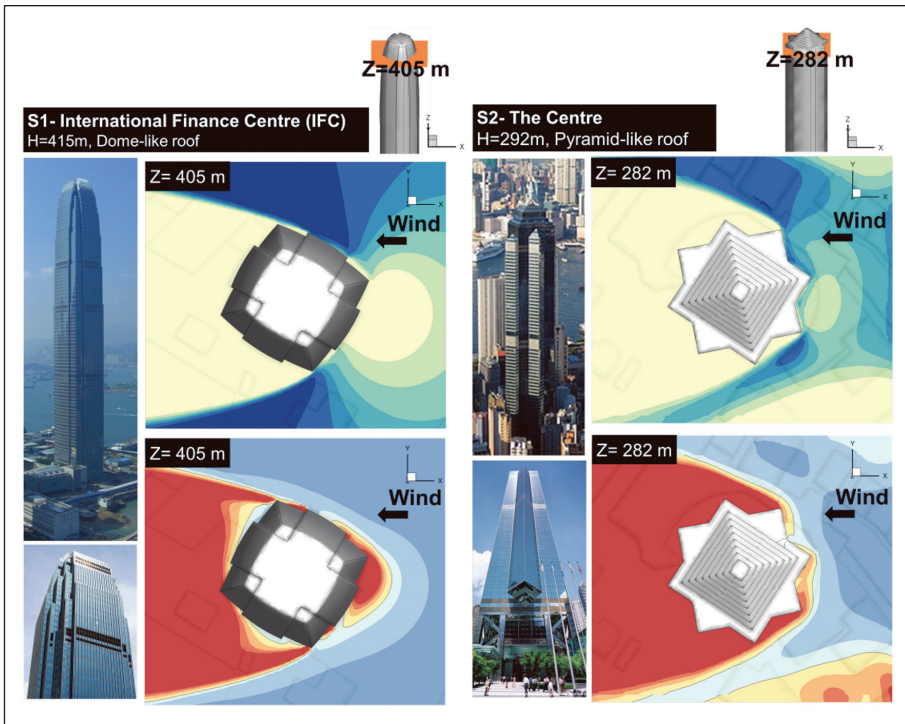


圖 9 數值模擬預測目標建築量體之風能密度與紊流強度分布圖

市型態參數之不同建築構型、屋頂構型、上游建築的遮蔽、相鄰建築群體間的通道間距、與平行雙棟建築街谷深度對風能特性的影響。舉例來說，圖9顯示不同建築構型為參數討論下，國際金融中心（IFC）具有建築角隅構型修正，其邊緣導角優化設計使建築側邊同時具有高風能、紊流強度低於18%且適合安裝風機之位置區域。而具八角形尖角構型之中環中心（The Centre）受其建築角隅構型影響，於尖角銳處造成邊界層分離低速且高紊流強度，建築側邊並不適合安裝風力發電機。

圖10則顯示相鄰建築群體間的通道間距之效應，交易廣場（Exchange Square I&II）因兩棟高層建築近90度夾角排列，當氣流流經窄小通道速度會因截面積縮小而上升，此為文丘里效應（Venturi effect）影響，使得在建築間通道到產生速度最大值，因此在建築間通道的上游處可製造約300 W/m<sup>2</sup>的風能，同時紊流強度低於18%，可作為可安裝風機之建議位置。而告羅士打大廈（Gloucester Tower）和公爵大廈（Edinburgh Tower）雖然兩棟高層建築也呈近90度夾角排列，但因具有上游高層建築的遮蔽阻擋，導致背風測

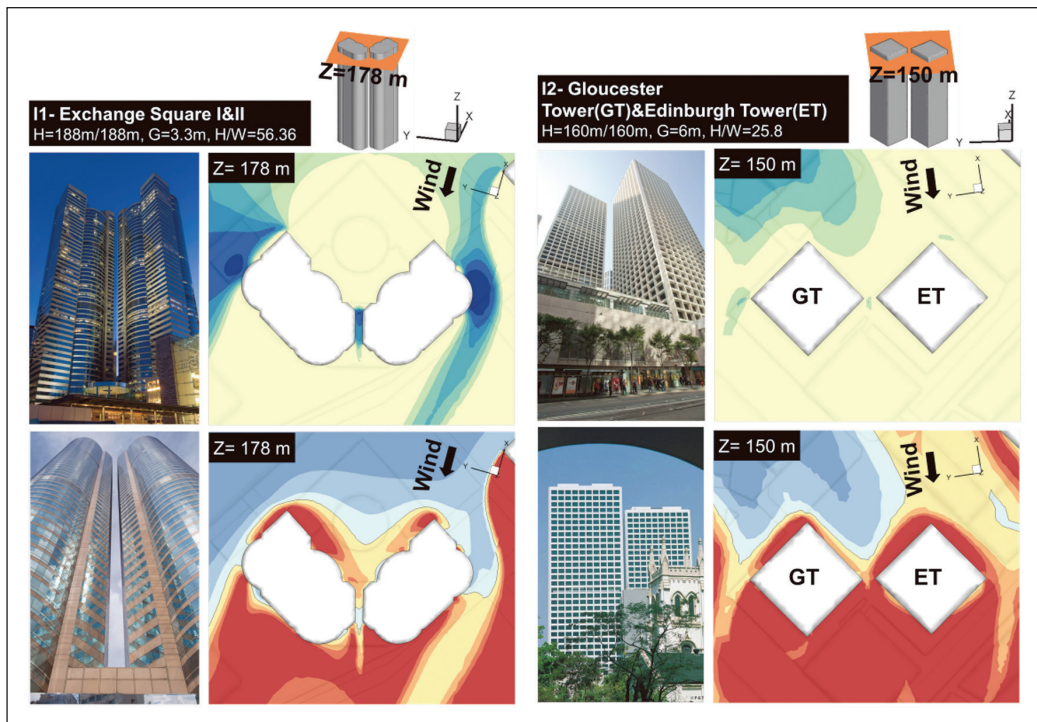


圖 10 數值模擬預測目標建築量體之風能密度與紊流強度分布圖

氣流較迎風面微弱，故下游處建築之風能明顯較上游建築低，並未能產生街谷風速加速效應。

本案例考慮真實城市型態、建築構型與微氣候條件，可由垂直與水平安裝風機評估結果發現因夏季季風風速小於冬季季風，故整體風能評估發現大部分區域之夏季風能密度皆小於 $200 \text{ W/m}^2$ ，而冬季風能產量皆有超過 $200 \text{ W/m}^2$ ，僅有IFC在夏冬兩季所產生之風能都符合商業應用需求[8]。儘管實地量測與應用CFD計算都較為費時，但從本研究結果

可得知CFD模擬對於氣流流動之物理現象有效互動極具重要性，另外由擬真數值模型所模擬的結果可觀察到高層建築之構型設計對氣流分布的影響，可作為未來建築設計用於提升風能潛勢之參考依據。

## 五、結論與未來發展

受惠疫情後歐美國家陸續解封及全球轉單效應及半導體擴廠效應，供應鏈產銷步調與新興高科技應用持續發展，帶動我國整體產業動能強勁，同時也導致全國用電量大幅



成長。故雖然再生能源裝置容量之分子不變，但因分母能源消費總量變大，以致再生能源佔比值並無達到預期。對於政府以再生能源及低碳燃氣發電為主之能源轉型規劃，太陽光電與離岸風能部分仍須持續擴增，才能達到2025年再生能源占比20%之目標。城市風能做為潛在新興綠能雖然尚未被具體規劃於綠能科技產業創新推動方案之中，但本研究結果證明城市風力發電潛能之可發展性，以達擴大SDG 7-可負擔的潔淨能源之目標，藉由城市形態參數設計討論風能利用最大化。本文利用實驗和數值方法以評估城市風能發展於密集城市化區域的初探，期望引起更多各界跨域專家的投入永續城市環境策略與風電發展潛能的研究發展。

## 謝誌

本研究於科技部計畫MOST109-2221-E027-011-MY2支持下完成。

## 參考文獻

1. N.A.a.S.A. (NASA), 2020 Tied for Warmest Year on Record, NASA Analysis Shows, NASA News & Feature Releases, <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20210114/>, 2021.
2. M. Zabarjad Shiraz, A. Dilimulati, M. Paraschivoiu, Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities, *Sustainable Cities and Society* 53 (2020) 101905.
3. A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, A framework for preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: Roof-mounted wind turbines, *Energy Conversion and Management* 214(2020) 112770.
4. K.C. Anup, J. Whale, T. Urmee, Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review, *Renewable Energy* 131 (2019) 268-283.
5. B. Li, Z. Luo, M. Sandberg, J. Liu, Revisiting the 'Venturi effect' in passage ventilation between two non-parallel buildings, *Building and Environment* 94 (2015) 714-722.
6. B. Blocken, T. van Hooff, L. Aanen, B. Bronsema, Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect, *Computers & Fluids* 48(1) (2011) 202-213.
7. A.-S. Yang, Y.-M. Su, C.-Y. Wen, Y.-H. Juan, W.-S. Wang, C.-H. Cheng, Estimation of wind power generation in dense urban area, *Applied Energy* 171 (2016) 213-230.
8. Y.H. Juan, C.Y. Wen, W.Y. Chen, A.S. Yang, Numerical assessments of wind power potential and installation arrangements in realistic highly urbanized areas, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110165.
9. A.-S. Yang, Y.-H. Juan, C.-Y. Wen, C.-J. Chang, Numerical simulation of cooling effect of vegetation enhancement in a subtropical urban park, *Applied Energy* 192 (2017) 178-200.
10. B. Blocken, W.D. Janssen, T. van Hooff, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus, *Environmental Modelling & Software* 30 (2012) 15-34.
11. T. Stathopoulos, R. Storms, Wind environmental conditions in passages between buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 24(1) (1986) 19-31.
12. T. Stathopoulos, Wind environmental conditions around tall buildings with chamfered corners, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 21(1) (1985) 71-87.
13. Y.-H. Juan, A.-S. Yang, C.-Y. Wen, Y.-T. Lee, P.-C. Wang, Optimization procedures for enhancement of city breathability using arcade design in a realistic high-rise urban area, *Building and Environment* 121 (2017) 247-261.
14. C.-Y. Kuo, R.-J. Wang, Y.-P. Lin, C.-M. Lai, Urban Design with the Wind: Pedestrian-Level Wind Field in the Street Canyons Downstream of Parallel High-Rise Buildings, *Energies* 13(11) (2020) 2827.
15. T. van Druenen, T. van Hooff, H. Montazeri, B. Blocken, CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrian-level wind speed, *Building and Environment* 163 (2019) 106293.
16. Y. Ishida, T. Okaze, A. Mochida, Influence of urban configuration on the structure of kinetic energy transport and the energy dissipation rate, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 183

- (2018) 198-213.
17. W. You, Z. Gao, Z. Chen, W. Ding, Improving Residential Wind Environments by Understanding the Relationship between Building Arrangements and Outdoor Regional Ventilation, *Atmosphere* 8(6) (2017) 102.
  18. W. Wang, Y. Xu, E. Ng, S. Raasch, Evaluation of satellite-derived building height extraction by CFD simulations: A case study of neighborhood-scale ventilation in Hong Kong, *Landscape and Urban Planning* 170 (2018) 90-102.
  19. R. Giridharan, S.S.Y. Lau, S. Ganesan, B. Givoni, Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong, *Building and Environment* 42(10) (2007) 3669-3684.
  20. J. Liu, M. Heidarinejad, S. Gracik, J. Srebric, The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities, *Energy and Buildings* 86 (2015) 449-463.
  21. W.S. Tang, J.W.Y. Lee, T.W. Hui, M.K.C. Yip, The "Urban density" question in Hong Kong: From absolute space to social processes, *City, Culture and Society* 17 (2019) 46-53.
  22. T. Tamura, T. Miyagi, The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83(1) (1999) 135-145.
  23. X. Xu, Q. Yang, A. Yoshida, Y. Tamura, Characteristics of pedestrian-level wind around super-tall buildings with various configurations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 166 (2017) 61-73.
  24. A. Elshaer, G. Bitsuamlak, A. El Damatty, Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization, *Engineering Structures* 136 (2017) 133-148.
  25. F. Toja-Silva, C. Peralta, O. Lopez-Garcia, J. Navarro, I. Cruz, On roof geometry for urban wind energy exploitation in high-rise buildings, *Computation* 3(2) (2015).
  26. I. Abohela, N. Hamza, S. Dudek, Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines, *Renewable Energy* 50 (2013) 1106-1118.
  27. L. Ledo, P.B. Kosasih, P. Cooper, Roof mounting site analysis for micro-wind turbines, *Renewable Energy* 36(5) (2011) 1379-1391.
  28. Y.-H. Juan, A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, C.-Y. Wen, A.-S. Yang, CFD assessment of wind energy potential for generic high-rise buildings in close proximity: Impact of building arrangement and height, *Applied Energy* 321 (2022) 119328.
  29. Y.-H. Juan, C.-Y. Wen, Z. Li, A.-S. Yang, Impacts of urban morphology on improving urban wind energy potential for generic high-rise building arrays, *Applied Energy* 299 (2021) 117304.