

多棟建築垂直太陽能板排列型態對街谷熱環境之影響

蘇瑛敏^{1*} 楊博鈞²

^{1*} 國立臺北科技大學建築系 教授（通訊作者，Email:ymsu@ntut.edu.tw）

² 國立臺北科技大學建築系建築都市設計碩士

摘要

都市化進程加速極端氣候事件愈加頻繁，全球已有逾 130 國提出「2050 淨零排放」目標，推動再生能源轉型已成為國際共識。太陽能光電（PV）因其將陽光直接轉化為電能的特性成為能源改革的重要途徑之一。建築物立面安裝太陽能板是解決土地資源限制的重要策略，但其是否潛在高溫效應仍具爭議，特別是在高樓林立的都市中，可能加劇都市熱島效應，進一步影響都市微氣候。

本研究以臺灣日照時常較長且陽光較強的高雄市為模擬基地，以計算流體力學（CFD）分析高層（100m）建築構成之 5*5 理想城市，模擬全年平均溫度下的溫熱風環境變化，探討不同建築排列組合，包含原始組（單棟）與三棟架設垂直太陽能板建築前排錯列、橫向並排、後排錯列、直排並列與斜向排列，共計六組方案。研究成果可得知在行人層（1.5m）高度下，不同太陽能板建築配置會影響熱氣於街谷中的分布與熱滯留趨勢。斜向排列與直排並列易造成熱氣滯留，局部升溫逾 2% 以上。前排錯列於中心街谷降溫達 4.9%，為整體表現最佳者，橫向並排次之，降幅為 3.9%。後排錯列呈現熱量於中後段逐排滯留。隨著高度增加，風速提升有助於緩解熱高溫現象，使建築冠層熱環境趨於穩定。

關鍵字： 垂直太陽能板、高層建築、微氣候、排列型態、計算流體力學(CFD)

Keywords: Vertical Solar Panels、High-Rise Buildings、Urban Microclimate、Arrangement type、Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. 前言

隨著都市化進程加速與極端氣候事件日益頻繁，台灣城市面臨日益嚴峻的熱環境挑戰。夏季高溫的頻率與強度逐年升高，進一步加劇城市熱島效應（Urban Heat Island, UHI）所帶來的能源負擔與健康風險，易導致戶外熱舒適度惡化與高溫相關疾病的發生率上升(Mirzaei, 2015)。為減緩氣候變遷衝擊，2015 年《巴黎協議》提出將升溫控制於工業化前水準 2°C 以內，並力求壓低至 1.5°C 。2023 年聯合國氣候變遷大會（COP28）強調 2030 再生能源需增至三倍、加速減少甲烷排放，再生能源成為解決能源危機的關鍵方案。

太陽能板被廣泛視為實現淨零轉型的重要手段之一。相較於屋頂型太陽能板，建築立面提供更大的可用面積，特別是在土地高度利用的都市環境中，垂直太陽能板具備不佔地且具擴展性的優勢，已逐漸成為高密度城市中的常見設計元素。然而，大量設置於建築立面的太陽能板，亦可能改變建築表面的熱邊界條件，進而影響街谷內風場結構與熱氣排散效率。在高密度建築環境中，都市風速本就受限於建築遮蔽，若太陽能板密集分布於多棟建築立面，是否加劇通風不良與熱堆積現象，導致室外熱環境惡化值得探討。

目前多數研究聚焦於太陽能板之能源效率與日照性能，對其潛在的都市微氣候影響探討仍相對有限。特別是在高密度城市街谷中，若未妥善規劃太陽能板之排列與設置方式，將可能造成熱氣累積區、阻擋風道或擾亂原有氣流動線，進而削弱戶外熱舒適度。隨著台灣都市發展趨勢趨於高密度化，都市物理結構與建築佈局（如建築高度、街廓尺度與功能配置）皆將影響城市氣候與環境條件(Merollari & Dervishi, 2024)。而建築間湍流效應與風速分佈的侷限，也使通風不良成為影響垂直太陽能板散熱能力與熱堆積的重要因子(Allegrini et al., 2012; Barron-Gafford et al., 2016; Lenzholzer, 2012)。

本研究以高層（100m）建築構成之 5×5 理想化城市環境為模擬場域，探討六種架設多棟太陽能板建築排列組合對熱環境之影響，包含原始組（單棟）、前排錯列、橫向並排、後排錯列、直排並列與斜向排列。模擬設定反映真實都市的建築配置條件，評估各配置下之風熱環境變化，以提供高密度都市中推動垂直太陽能設計時，關於熱環境面向之具體建議與指引。

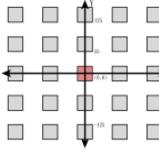
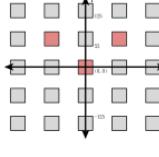
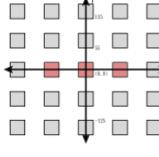
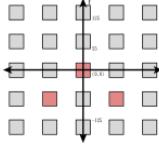
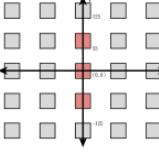
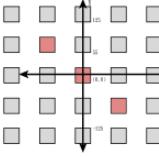
2. 研究設計

2.1 理想城市配置

表一：理想城市配置彙整表

概念城市模型	建築尺寸與切面高度
<p>INLET</p> <p>40m 30m 20m 10m</p> <p>上風區 I</p> <p>II 中風區 III</p> <p>IV 下風區 V</p> <p>監測街谷區域</p> <p>監測逐排街谷</p> <p>監測中心面積區域</p>	<p>100 M 建築冠層</p> <p>50 M 建築中層</p> <p>1.5 M 行人層</p> <p>30M</p> <p>立面70%架設位置垂直太陽能板</p>

表二：太陽能板模擬方案建物配置彙整表

原始組(單棟)	建築高度 100M		架設垂直太陽能板建築		
	前排錯列	橫向並排	後排錯列	直排並列	斜向排列
					

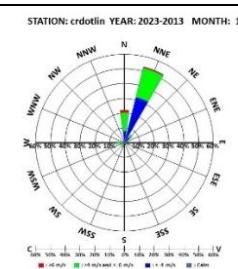
本研究建築配置參考 Jian Hang (2018)、Yu-Hsuan Juan et al.(2021)研究，以 5x5 共計 25 棟建築之理想城市模型 (Idealized Urban Model) 為依據，設定街道寬度為 Y 軸向通道寬度 30m 與 X 軸向通道 40m，建築面積固定長、寬皆為 30m。以台灣南部擁有長時間且穩定日照條件且高容積率的高雄市高層 (100m H) 建築為研究對象，透過 Sketchup 光照模擬軟體分析高雄地區太陽入射角跟建築量體的關係，其陰影面積皆為建築高度的 30%，故本研究太陽能板可架設於建築立面的面積為 70%。並根據《高雄市建築物設置太陽光電設施辦法》太陽能板法規的單向面積至少 50%。太陽能板架設於建築物南向立面使太陽能板效益最大化(Cheng et al., 2020; Elghamry et al., 2020)。如表一所示。探討六種垂直太陽能板排列組合對熱環境之影響，包含原始組（單棟），多棟建築架設太陽能板前排錯列、橫向並排、後排錯列、直排並列與斜向排列。如表二所示。太陽能板配置方式以集中分布為模擬最優影響最少方式來架設。分析行人層 (1.5m)、建築中層 (50m)、建築冠層 (100m) 風熱場差異，分析比較架設多棟垂直太陽能板建築下方區域平均溫度 (A) 至 (L)。分別以上風區 (長型 I、II)、中風區 (長型III、IV)、下風區(長型V)三區的平均數值分析，探討最佳配置架設垂直太陽能板都市街谷環境的趨勢變化。如表二所示。

2.2 邊界條件及氣象參數設定

本研究使用 ANSYS Fluent v18 (CFD) 流體力學模擬軟體進行三維空間仿真模擬分析。為獲得更接近真實數據之結果入風口的邊界條件設定使用風速梯度 ABL。研究採用 2019-2023 年 CODIS 氣候資料服務系統 COV700 高雄三民測站作為參數設定，統計近五年全年風向以北北東風為主 (佔 54%)，平均溫度為攝氏 28.53 度。氣象資料設置如表三所示。

表三： CODIS 三民測站 2019 至 2023 氣象參數彙整表

項目	內容
測站名稱	高雄 COV700_三民
2019 年至 2023 年全年平均風速	1.94/s
2019 年至 2023 年全年主要風向	北北東風 (54%)
2019 年至 2023 年全年平均氣溫	28.53°C



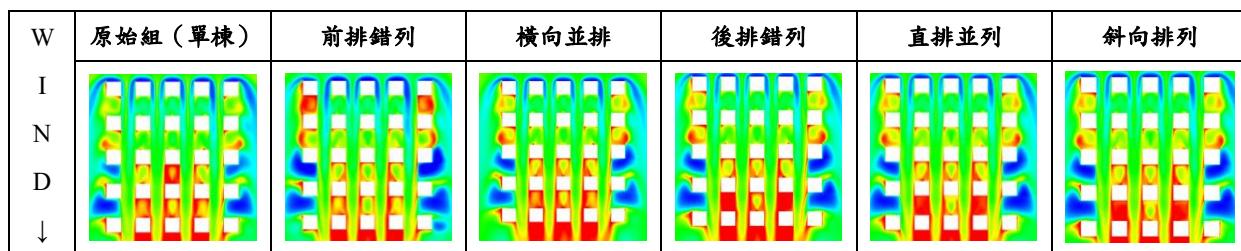
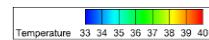
STATION: crdotlin YEAR: 2023-2013 MONTH: 1-12

Legend:
 ■ 0-1m/s
 ■ 1-2m/s
 ■ 2-4m/s
 ■ > 4m/s

3. 模擬結果分析

3.1 行人層 (Z=1.5m) 街谷熱環境分析

100 公尺建築行人層高度 ($Z=1.5\text{m}$) 配置下的風熱環境分析，藉由上風區（長型 I、II）、中風區（長型 III、IV）、下風區（長型 V）的氣流影響，整體變化幅度介於 0.95 m/s 至 0.49 m/s 之間，顯示即使架設不同數量與排列方式的太陽能板，對整體風速影響相對一樣有限。中心九宮格街谷區域計算平均溫度得出，多棟配置前排錯列 (37.18°C) < 多棟配置橫向並排 (37.17°C) < 多棟配置後排錯列 (37.26°C) < 單棟配置的原始組 (37.27°C) < 多棟配置直排並列 (37.5°C) < 多棟配置斜向排列 (37.58°C)。得出橫向並排與前排錯列配置的溫度較低，顯示這兩種配置能相對有效減緩熱高溫現象，具備較佳的熱環境表現。直排並列與斜向排列的平均溫度高於單棟配置的原始組，尤其是斜向排列最高達 37.58°C ，顯示熱氣容易在街谷間滯留，不利於熱氣擴散。後排錯列雖看似低於單棟架設，但熱量更集中於街谷後排（如 G、H、I 區），導致熱氣在建築背風側累積、擴散困難，產生局部熱高溫現象更為嚴重。但由此可見，多棟架設垂直太陽能板建築的排列方式對於都市街谷的熱環境有明顯影響，其中前排或橫向分布的配置更有利於熱舒適性的維持。

表四：行人層 ($Z=1.5\text{m}$) 溫度變化分析彙整表

前排錯列配置因整體風場相對通暢有助熱氣在早期即被導出，減少熱量於街谷內部累積。但在（長型 I）排街谷的左右兩側皆有發現，早期產生的熱被風內捲產生滯留的情形。上風區 (I、II) 溫度分別為 36.4°C 與 36.8°C ，中風區 (III、IV) 為 36.9°C 與 37.5°C ，整體呈現穩定遞增但仍屬低溫表現；下風區 (V) 為 39.0°C ，為五組中最低，顯示該配置有效減緩末端熱滯留現象。橫向並排配置整體溫度分布表現平穩。上風區 (I、II) 溫度為 36.5°C 與 37.1°C ，中風區 (III、IV) 為 36.9°C 與 37.5°C ，皆未出現顯著熱高溫現象；下風區 (V) 為 39.0°C ，略高但仍屬可控範圍。橫向架設的太陽能板配置於中段熱氣相較其他組滯留程度較少，後排亦未出現顯著溫熱集中區域，整體可視為風熱平衡較佳的配置之一。後排錯列配置中，上風區 (I、II) 溫度為 36.7°C 與 36.9°C ，表現穩定；中風區 (III、IV) 為 36.9°C 與 37.1°C ，變化不大，但下風區 (V) 升至 39.1°C ，顯示熱氣傾向末端升高聚集，尤其太陽能板集中設置於後段建築時，缺乏氣流推力導致升溫現象。直排並列配置亦呈現熱氣沿縱深方向逐步產生高溫趨勢。上風區 (I、II) 為 36.9°C 與 37.3°C ，中風區 (III、IV) 為 37.1°C 與 38.6°C ，溫度逐步升高；下風區 (V) 則為 39.3°C ，為所有配置中最高值，顯示熱氣大量滯留於末段街谷。在線性街谷內持

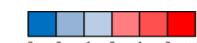
續累積，當風速於末段減弱時加劇後排熱環境的惡化。斜向排列配置為五組中熱高溫現象最明顯者。上風區（I、II）為 36.6°C 與 37.4°C ，中風區（III、IV）為 37.2°C 與 38.5°C ，熱區逐漸漫延；下風區（V）升至 39.2°C ，與直排並列相當，顯示整體熱氣高度累積。此配置因垂直太陽能板建築跨越多排街谷，干擾氣流順向傳遞，造成街谷內部紊流與渦流交錯，熱氣無法有效外排，最終導致整體街谷呈現多區域溫度提升與局部熱內捲現象。如表四所示。

3.2 行人層 ($Z=1.5\text{m}$) 上中下風區熱環境分析

根據原始組與五種架設太陽能板建築排列方式下的街谷行人層溫度資料進行比較，觀察不同配置條件下熱環境變化趨勢。以街谷 A 至街谷 L 為對象，分別計算五種變向配置相較於原始組的平均溫度變化百分比。

前排錯列配置在熱環境控制上表現相對最佳。街谷 A (+1.3%)、街谷 B (+0.8%)、街谷 C (+1.3%) 的行人層平均溫度略有上升，且其中街谷 A 與 C 即為太陽能板正下方區域，但由於前排氣流條件較好，風速較高，有效抑制熱氣滯留，使後排街谷的溫升趨勢不明顯，甚至在街谷 E 出現顯著降溫 (-4.9%)，整體效果優於其他變向配置。橫向並排配置則為五組中表現第二佳者。在街谷 D (+0.8%)、街谷 E (-3.9%)、街谷 F (+0.7%) 雖呈現局部溫度變動，但由於太陽能板為橫向架設，後方街谷的溫升幅度亦相對較小。後排錯列配置則呈現不同的分布樣態。前排街谷變化不大，而中心街谷 E 平均溫度亦下降 (-3.6%)，但後排街谷如 G(+2.8%)、I(+2.7%) 出現溫度顯著上升，顯示熱氣傾向在後排滯留，可能因太陽能板位置靠後且風速不足所致。直排並列配置在多數街谷中顯示溫度上升現象，尤其後排區域變化明顯。如街谷 A (+1.9%)、街谷 B (+1.7%)、街谷 C (+1.9%) 與街谷 I (+2.1%) 皆呈正向上升，顯示此配置可能導致熱氣沿街谷縱向集中傳遞，特別在風速減弱的中後段區域，容易形成熱環境。即便在街谷 E 與 H 的溫升幅度稍小，但整體趨勢仍反映出縱向線性架設方式對於後排區域的熱環境帶來持續性影響。斜向排列配置則為五組中溫度上升趨勢最為顯著者，此配置在不同街谷方向上形成複雜紊流與渦流結構，不僅影響下方街谷，也加劇熱氣於後排區域熱高溫現象。如表四與表五所示。

表五：行人層 ($Z=1.5\text{m}$) 街谷變化分析趨勢彙整表 (%)



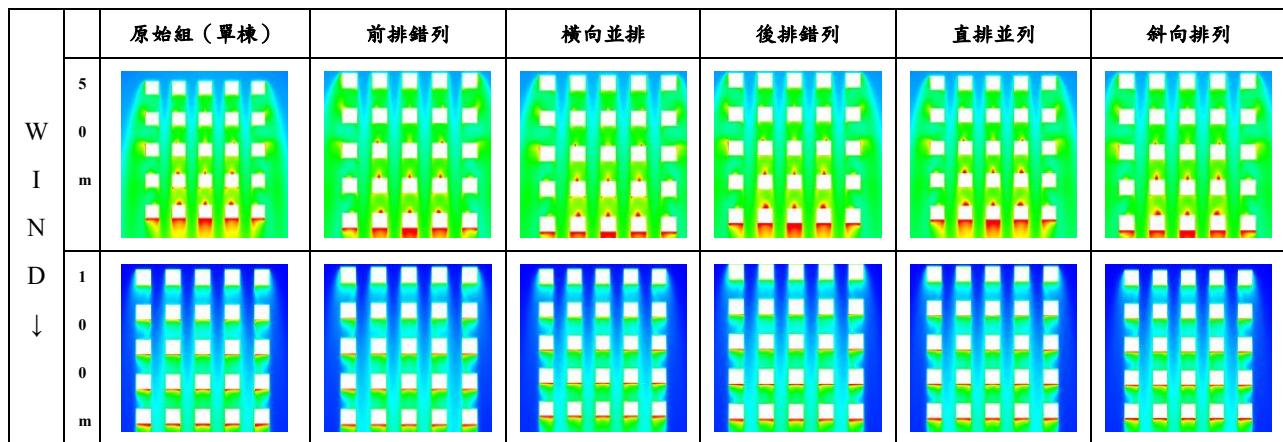
	街谷 A	街谷 B	街谷 C	街谷 D	街谷 E	街谷 F	街谷 G	街谷 H	街谷 I	街谷 J	街谷 K	街谷 L
前排錯列	1.3	0.8	1.3	0.1	-4.9	-0.2	-0.8	-2	-0.8	0.3	-0.4	0.2
橫向並排	0.4	0.3	0.5	0.8	-3.9	0.7	0.3	-0.5	0.1	0.3	-0.1	0.3
後排錯列	0.6	0.4	0.5	0.7	-3.6	0.4	2.8	-0.2	2.7	0.9	0.1	1
直排並列	1.9	1.7	1.9	1.2	-3.7	1	2	-1.3	2.1	1.2	-0.1	1.1
斜向排列	2.1	1.9	2.2	1.3	-3.5	1.1	2.3	-0.9	2.2	1.4	0.2	1.4

3.3 不同高度 ($Z = 50\text{m} / 100\text{m}$) 太陽能板架設對街谷熱環境之影響分析

觀察多棟建築架設太陽能板於兩種建築中層 (50m) 與高層冠層 (100m) 於街谷熱環境的差異。分析對象涵蓋五種架設配置方式與原始組（單棟架設）進行比較。模擬結果顯示，在 50公尺 與 100公尺 兩高度下，各配置對街谷溫度變化趨勢大致相似，溫度變異範圍集中於 29.3°C

至 33.1°C 之間，整體差異極小。如街谷 L 的觀測點中，斜向排列於 50m 為 33.1°C ，於 100m 為 33.1°C ；直排並列亦分別為 33.1°C 與 33.1°C ，幾乎無顯著變化，顯示其對當層街谷影響幅度有限。如表六所示。

表六：建築中層 ($Z=50\text{m}$) 與冠層 ($z=100\text{m}$) 溫度變化分析彙整表



5. 結論與建議

5.1 多棟垂直太陽能板架設建築，直排並列與斜向排列造成較嚴重熱高溫現象。

多棟太陽能板建築配置型態明顯影響街谷中熱高溫處的分布與滯留趨勢。直排並列與斜向排列對熱環境造成的負面影響最為明顯。這兩種排列方式熱氣無法及時排散，容易於建築群內部形成熱氣內捲與局部積聚現象。斜向排列尤其嚴重，多處街谷溫升超過 2% 以上，且沿街谷縱深溫度呈階梯式遞增，顯示熱氣持續累積。相較橫向並排與前排錯列因能氣流通有效使熱量排散，展現出較優良的降溫潛力。風速尚充足的前段完成太陽能板加熱與遮蔽過程，有助於後段街谷維持通風性與熱環境穩定性。綜合觀察，熱環境最顯著的三種配置為後排錯列、直排並列與斜向排列，均呈現明顯的末段溫升，強調配置策略中需避免熱源在建築群後端集中。

5.2 區位置決定熱擴散程度，末段熱高溫現象與遮蔽效應需同步考量。

在不同配置下，街谷中的上風區至下風區溫度呈現階梯式上升趨勢，顯示風場衰減與垂直太陽能板架設建築配置位置關係密切。前排錯列與橫向並排配置於中後段溫度控制較佳，有助於避免末段熱氣滯留；而直排並列與斜向排列則造成後排（長型V）溫度最高達 39.3°C ，為熱積現象最明顯者。模擬結果突顯建築遮蔽與風向關係，應避免於下風區集中設置太陽能板，否則即使總風速變化不大，熱氣仍可能因風場紊亂滯留於街谷末段。

5.3 架設高度對熱環境影響有限，中高層配置具穩定性與彈性。

針對多棟垂直太陽能板對街谷熱環境的影響進行比較分析，行人層 ($Z=1.5\text{m}$) 的變化幅度相較於建築中層 (50m) 與高層冠層 (100m) 劇烈。例如斜向排列與直排並列兩配置於理想城市中的街谷中心 50m 與 100m 模擬值均為 33.1°C ，差異可忽略不計。此結果說明當熱源距離地面較遠，氣流亦能快速擴散熱量，即使架設面數量與位置一致，實際溫度變化仍相當有限。

6.致謝

特別感謝科技部計畫(計畫代號 NSTC 114-2221-E-027-005-MY2) 的經費贊助。

7. 參考文獻

- [1] Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2012). Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106, 464-473.
- [2] Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6(1), 35070.
- [3] Cheng, L., Zhang, F., Li, S., Mao, J., Xu, H., Ju, W., Liu, X., Wu, J., Min, K., Zhang, X., & Li, M. (2020). Solar energy potential of urban buildings in 10 cities of China. *Energy*, 196, 117038.
- [4] Yu-Hsuan Juan, Chih-Yung Wen, Zhengtong Li, An-Shik Yang,(2021)Impacts of urban morphology on improving urban wind energy potential for generic high-rise building arrays, *Applied Energy*, Volume 299
- [5] Lenzholzer, S. (2012). Research and design for thermal comfort in Dutch urban squares. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 39-48.
- [6] Merollari, J., & Dervishi, S. (2024). Analyzing the impact of urban morphology on solar potential for photovoltaic panels: A comparative study across various European climates. *Sustainable Cities and Society*, 115, 105854.
- [7] Mirzaei, P. (2015). Recent Challenges in Modelling of Urban Heat Island. *Sustainable Cities and Society*, 76.