

## 新加坡節能建築研究概況

建築帷幕與外牆所扮演的角色為建築的冷卻負荷，圖 1 為新加坡建築的冷卻負荷，其中商業類建築外殼的能耗佔 25%，住宅建築外殼的能耗佔 38% (Chong, 2018)。綠建築標章在新住宅建築外殼的標準，以往金級能耗設定為 25 W/m<sup>2</sup>，白金級能耗為 20 W/m<sup>2</sup>；在 2016 年訂定額外的需求圖 2，所有發展中建築物各方向平均住宅建築外殼熱傳透率(RET<sub>V</sub>, Residential Envelope Transmittance Value)最高為 25W/m<sup>2</sup>。

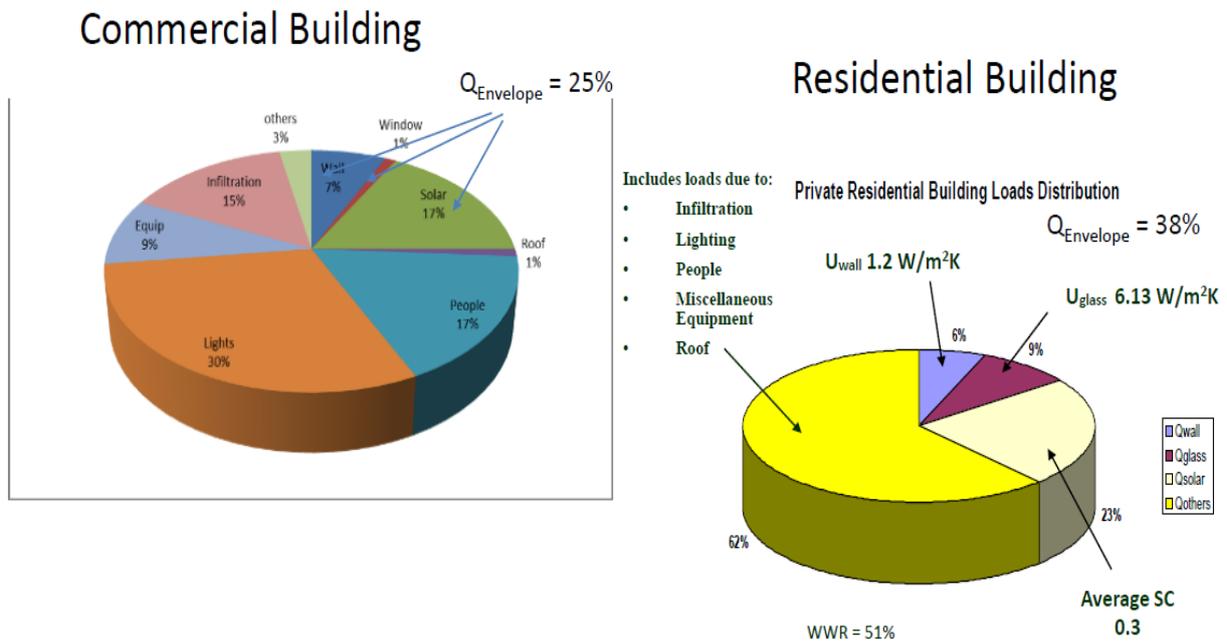


圖 1、新加坡建築的冷卻負荷(Chong, 2018)



圖 2、新加坡綠建築標章在新住宅建築外殼的規範(Chong, 2018)

圖 3 為改善建築外殼的方法，分為三個方向(1)調查評估 ETTV/RETV (ETTV, Envelope thermal transfer value) (建築架構與熱阻等、GM 計畫研究)；(2)工程技術 (相關技術搜尋、建立技術資料庫) (3)研究、發展及驗證 (經費與技術援助)。

## DRIVING BETTER FAÇADE PERFORMANCE

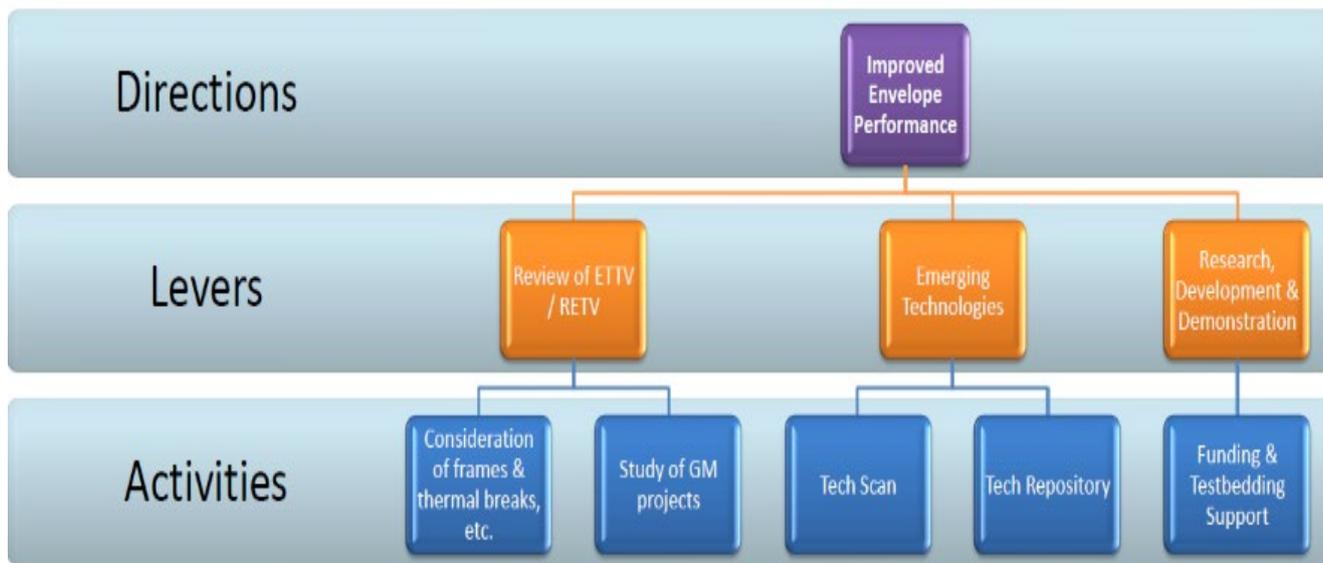


圖 3、新加坡改善建築外殼的方法(Chong, 2018)

開發用於熱舒適環境的節能建築外牆可加強現有的 ETTV/RETV 配方，以便考慮節能窗戶，動態外牆和具生產力材料；節能住宅建築外牆結構研究，主要集中在具有影響熱舒適性的建築外牆特徵之新舊住宅開發。重新審視 ETTV 方程式，框架及玻璃 U 值計算，考量開窗及隔熱特性，並由 BCA SkyLab 驗證 ETTV/RETV (圖 4)。

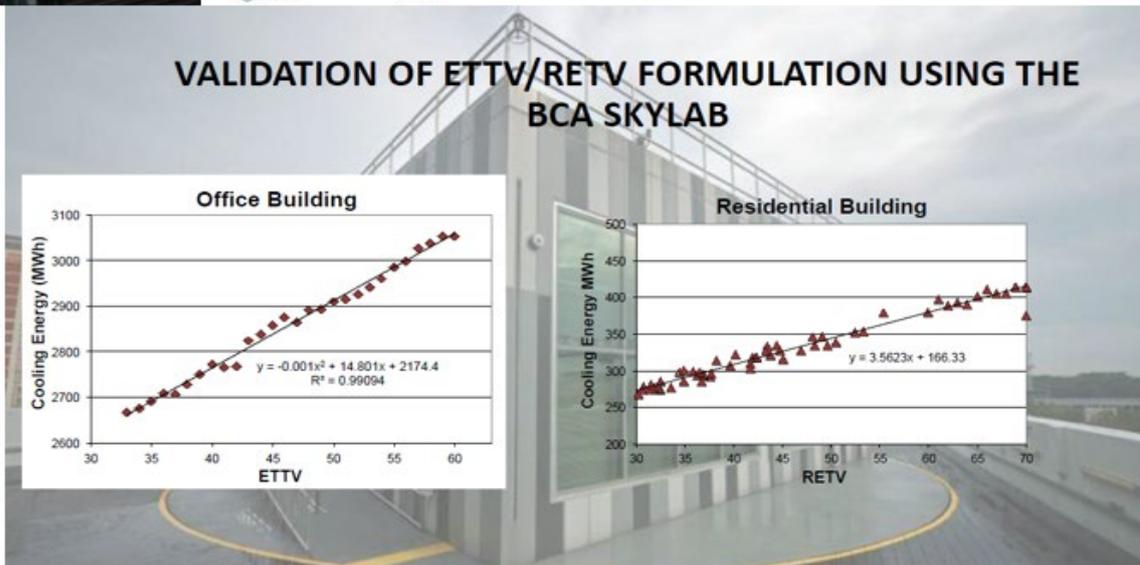
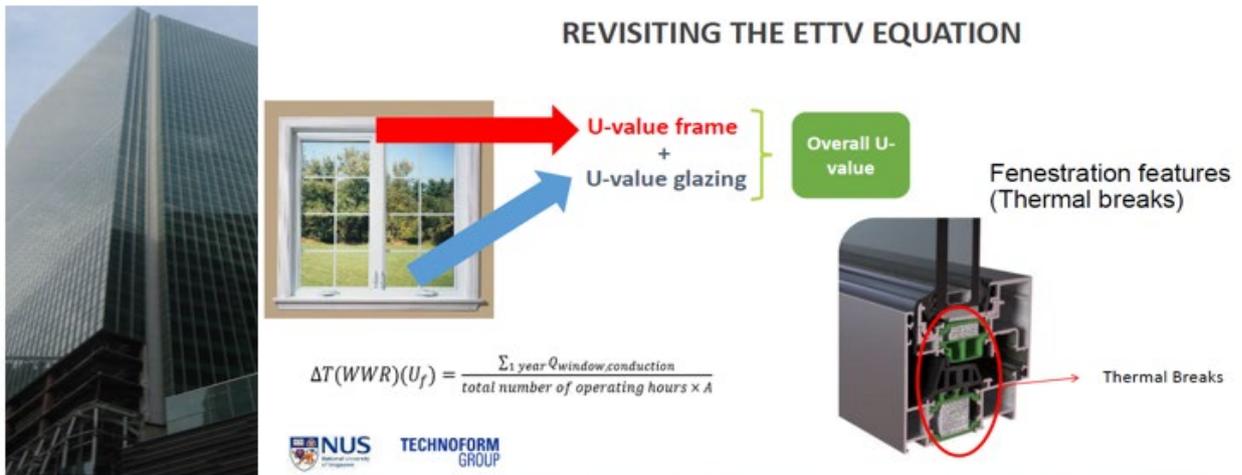


圖 4、新加坡節能建築外牆研究(Chong, 2018)

採光方面：建立照明偏好、設計指南和預測方法。透過測量、主觀調查和模擬了解新加坡的照明偏好。支持日光建築的設計，改善與戶外的連接。可節省 25% 的照明能源及整體建築能耗節省 2.5~4%。圖 5 為新加坡科技設計大學 (Singapore University of Technology and Design, SUTD) 校園中心的高動態範圍 (HDR) 亮度照片及基於氣候的日光模擬。

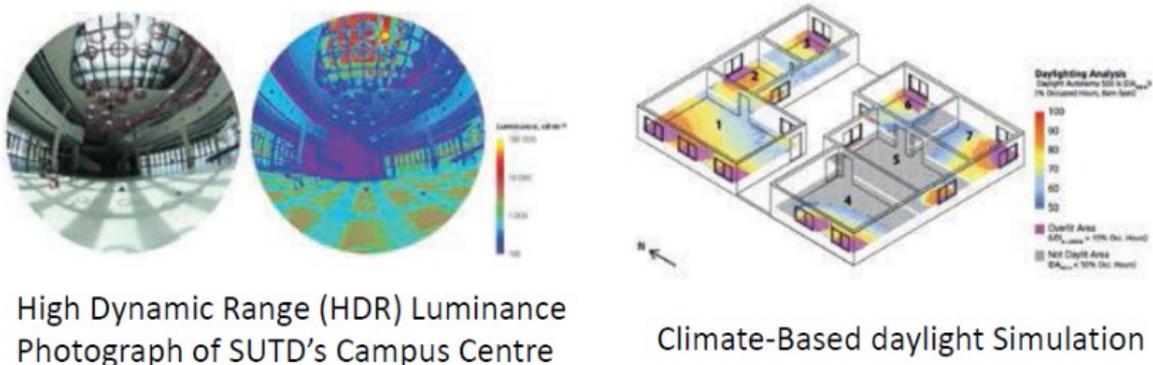


圖 5、新加坡節能建築採光模擬研究(Chong, 2018)

熱帶地區建築物冷漆之相變材料(圖 6)，第一層反射太陽輻射，下一層薄薄的相變材料吸收傳導進入建築物的熱量；可應用於新建築物和現有建築物表面，包括水平和垂直表面。熱反射塗層改善窗框的熱性能：深色的反光顏料塗在鋁窗框上，它能夠反射至少 20% 的近紅外輻射，其中一些即使沒有底漆也能實現對鋁的良好附著力。可應用於新的和現有的金屬結構，而無需剝離基礎塗料，除了建築外立面外，這種塗料也可以用於汽車和物流應用。熱帶建築的太陽能控制智能窗，開發具有可見光透射率、紅外反射、低熱透射率、耐用性和低成本之控制太陽能控制窗。增強城市聲音控制：設計工具、降噪系統和城市聲環境評估。開發音景掩蔽技術，以提高公共區域居民的聽覺舒適度。擬議的音景方法利用主動降噪技術，保持住宅區的自然通風，可基於心理聲學掩蔽方法實現環境噪聲降低，心理聲學掩蔽方法在感知上對居民更舒緩及放鬆，並且還可引發積極的生理反應。

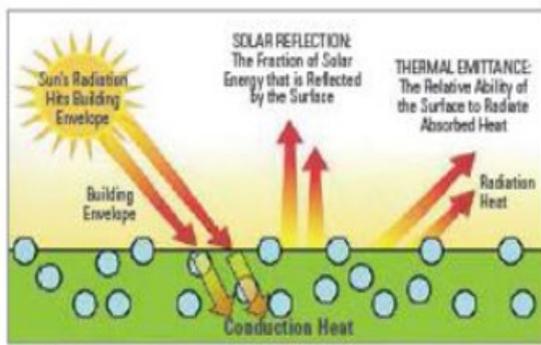
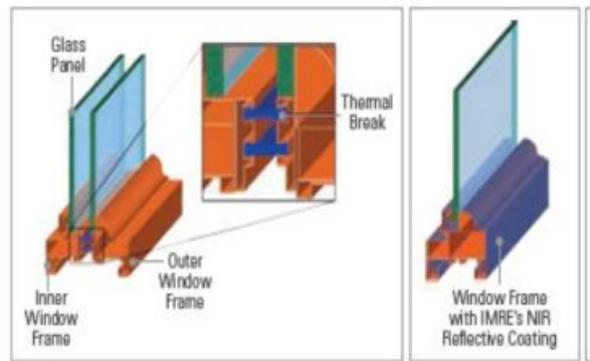


Fig. 1 Cool Coloured Coating System

冷漆之相變材料



Conventional Thermal Break Approach

Positive Engineering Approach

窗框熱反射塗層



太陽能控制智能窗



城市聲環境評估

圖 6、新加坡節能建築研究項目(Chong, 2018)

BCA Skylab 是一個先進的設施，以加利福尼亞州勞倫斯伯克利國家實驗室(LBNL)的 Flexlab 為模型，具有可旋轉和全面隨插即用(plug-and-play)測試系統，用於測試和開發創新的節能建築技術。在 Flexlab 的長期技術合作夥伴 National Instruments (NI)與新加坡建設局合作下，採用創新的混合設計，將建築管理系統與硬體和軟體驅動的高精度儀表系統集成在一起，為熱帶地區建造了世界上第一座高樓可旋轉實驗室 SkyLab。Skylab 位於新加坡建設局七層高的建築頂部(圖

7)，為小型（僅 132 平方公尺，約 1,400 平方英尺）設施專為研究能效建築產品和策略而設計。創造高效、前瞻、可持續建築的策略是 Skylab 的目標。此外也將支持 BCA 制定新加坡建築規範和產品標準。Skylab 設置為兩個相鄰並且完全相同單元，作為實驗組與控制組的研究對照。進行測試的項目包含照明設施 LED 與 T5、自動色調、冷光束和熱致變色玻璃等。該設施包含 200 多個傳感器和一個最先進的建築管理系統，用於量測性能指標，如能源性能、室內環境性質、室外環境參數和建築自動化系統指標（圖 8）。由於設施可以旋轉 360 度（完成完整旋轉需要大約 30 分鐘），利於面向不同方向之實驗需求，對於研究人員研究照明效率和陰影的測試尤為重要 (Greg, 2016; Lee, 2016)。Skylab 基礎設施如表 1 (Building and Construction Authority, 2015)，設有相關建築能耗測試及檢測設備，包含外部建築元素、通風設備、照明及數據收集系統等。



圖 7、熱帶可旋轉實驗室 SkyLab (Ariffin and Fai, 2016)



圖 8、Skylab 監控系統(Arifin and Fai, 2016)

表 1、Skylab 基礎設施(Building and Construction Authority, 2015)

物理設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 兩個測試單元，每個 40 平方公尺，天花板高度為 3.6 公尺</li> <li>➤ 完整的戶外環境</li> <li>➤ 可旋轉平台</li> <li>➤ 完全可重新配置的外觀和 M&amp;E 系統</li> <li>➤ 真實的辦公環境</li> <li>➤ 綜合控制室</li> </ul>	
技術特點	建築外部元素	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 上釉和不透明組件</li> <li>➤ 外部/內部遮陽設備</li> <li>➤ 絕熱牆和屋頂</li> </ul>
	ACMV	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 具有內置風機盤管單元的可重新配置的 A/C 系統（例如可變風量、輻射板、冷樑、置換通風、UFAD）</li> <li>➤ 隔熱的頂部輻射板</li> </ul>
	照明	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 具有內置 LED 的可重配置照明功能</li> <li>➤ 照明控制（例如可調光鎮流器、可調節控制裝置）</li> </ul>
	數據採集 (DAQ) 和控制系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 測試和參考單元的本地 DAQ 服務器</li> <li>➤ 每個單元安全數據庫</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 基於 LabView 和 SCADA 的控件，可客製化工具</li> <li>◆ 基本 ACMV 控制</li> <li>◆ 其他系統的控制程序（例如照明、陰影）</li> <li>➤ 全面的監控和數據可視化功能</li> <li>◆ 用戶界面</li> </ul>
	儀表	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 電能計量</li> <li>◆ A/C 及照明</li> <li>◆ 全部設施以及單個插頭負載</li> <li>➤ 高精度熱負荷測量</li> <li>◆ 通過建築立面的熱通量</li> <li>◆ 每個單元的冷卻水流量計和溫度傳感器</li> <li>➤ 其他高精度儀器</li> <li>◆ CO2 感測器</li> <li>◆ 空間感測器</li> <li>◆ 空氣供應流量測量</li> <li>◆ 光線和眩光測量</li> <li>◆ 校準功能</li> <li>◆ 天氣站</li> </ul>

Skylab 由國家研究基金會資助 BCA 的建築環境研究和創新研究所、南洋理工大學能源研究所、勞倫斯伯克利國家實驗室(LBNL)合作研究開發，既有研究項目為：外牆、空調、照明和控制等。於 2017 年獲獎「the IES Prestigious Engineering Achievement Awards 2017」。Skylab 第一階段研究主題如圖 94 所示，從 2016 年至 2018 年 2 月，研究主題為五個項目：LED 照明與日光、自動百葉窗、冷樑與 EC 馬達、電致變色及複合項目一至四。研究成果（圖 95 與圖 96），LED 照明與日光、百葉窗控制可達成 15~20% 節約能源及獲得視覺的舒適性；與沒有自動百葉窗的 T5 燈相比，帶有可調光 LED 照明的組合式自動反光百葉窗能夠實現高達 74% 的節能效果。2018 年研究主題為 ETTV/RETV 熱舒適性、隱形 PV 外牆、新加坡日照、冷卻材料等（圖 95）。智能玻璃為創新突破性技術（圖 97），可見光 (VIS) 穿過玻璃；微奈米粒子與紫外線 (UV) 輻射相互作用，並隨紅外光 (IR) 一起散射到玻璃邊緣；降低加熱和冷卻成本。

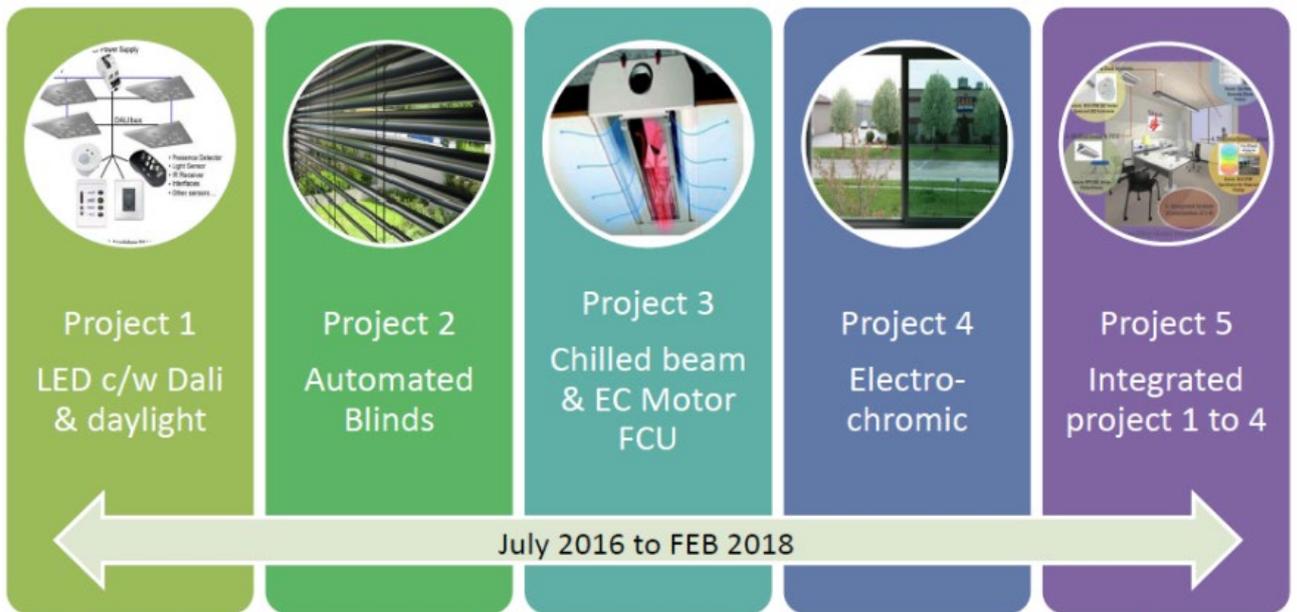


圖 9、Skylab 第一階段研究主題(Chong, 2018)



圖 10、Skylab 2018 年研究主題(Chong, 2018)

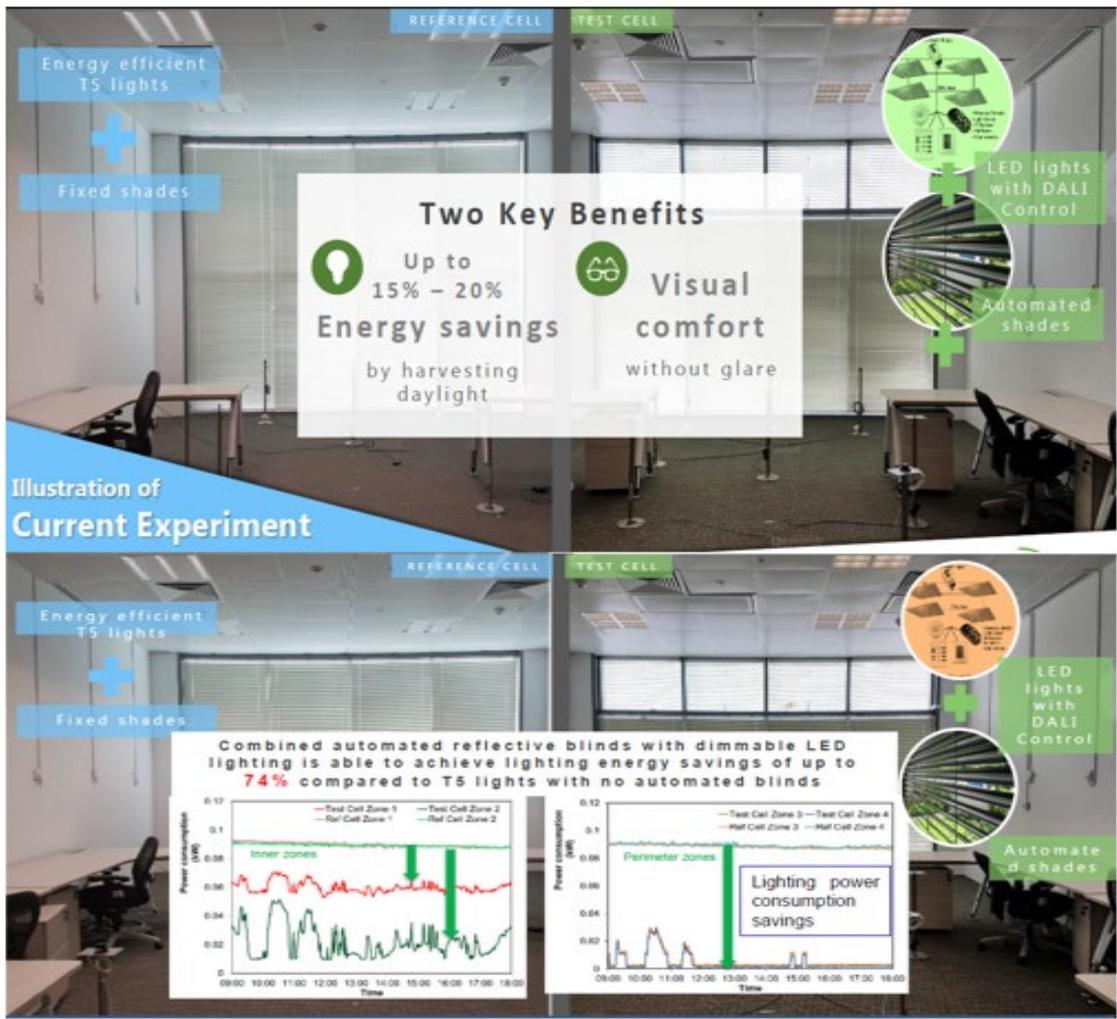


圖 11、Skylab 第一階段研究主題成效(Chong, 2018)

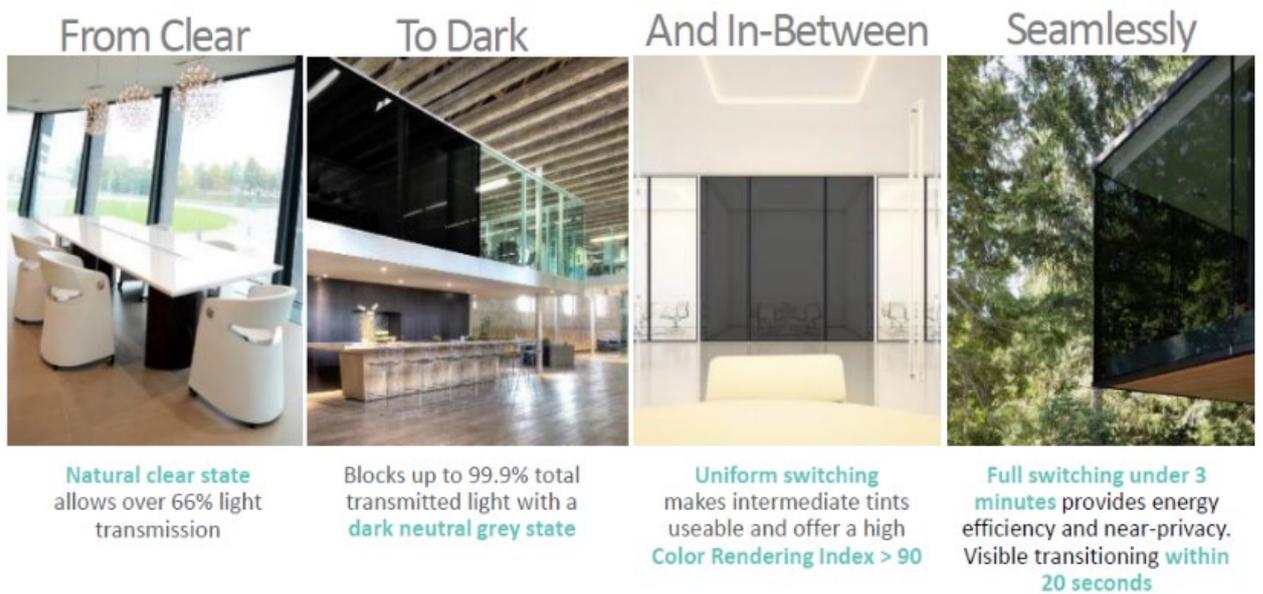


圖 12、Skylab 開發智慧玻璃(Chong, 2018)

2019 年計劃進行之研究，以降低環境溫度（冷卻策略）為目的，例如新的傾斜翅片空調系統、節能建築立面採光和冷建築材料(Cool Construction Materials)等。LBNL 和 BCA Skylab 持續合作將有助於比較不同氣候條件下的技術性能，並進一步改進這些技術以適應新加坡的當地氣候。合作研發項目有不同氣候下的技術性能（例如節能窗戶、外牆、屋頂）、創新建築技術複合太陽光電(BIPV)技術包含透明玻璃、智能空調技術、使用模型預測控制(MPC)等 (Building and Construction Authority, 2017; Bhunia, 2017)。研究成果概要如表 2 ( Building and Construction Authority, 2017; Lamano et al, 2018; Bhunia, 2017; Yang, 2018) 。在 Skylab 上測試的新興技術希望能在辦公室、學校、家庭和公共設施中找到實際的應用。

表 2、Skylab 研究項目與成果(Building and Construction Authority, 2017)

No.	技術	描述	潛能/優勢
1	自動反光百葉窗具 LED 調光控制	該研究調查了幾種照明的能源效能及採光技術的的視覺舒適度（包含 LED、自動調光照明和自動反光百葉窗）。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 與具有手動百葉窗和不調光控制的 T5 燈相比，使用具有自動反光百葉窗的可調光 LED 照明能夠達成高達 74% 的照明節能，同時有效消除眩光不適。</li> <li>➤ 可適用於不同類型的空間，例如辦公室、教室、生活區等。</li> </ul>
2	冷樑	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 冷樑是一種創新且節能的空調技術。它通過冷卻盤管內的循環冷卻水提供輻射和對流冷卻。</li> <li>➤ 與傳統的風機盤管單元不同，冷樑系統沒有內置風扇，因此節省了能源。</li> </ul>	與傳統系統相比，該系統可藉由降低風扇功率和製冷能量達成更高的節能效果。由於沒有活動部件，因此也幾乎不需要維護。
3	智能照明	智能照明使用傳感器根據居住者和當前周圍環境的存在自動調節人造光的亮度。	結果顯示，使用智能照明可節省高達 47% 的照明節能。與自動遮陽控制相結合，可發揮更高的節能潛力。

4	熱致變色/ 電致變色 玻璃	熱變色玻璃是一種自動著色和熱響應玻璃技術，可實現最佳照明和熱穩定。電致變色玻璃可以根據周圍環境條件，乘員熱量或視覺舒適度等改變透射率。	該技術有助於減少太陽熱量進入空間；因此，節省空調能源。它提供了改善空間居住者所體驗的視覺舒適度和熱舒適性的潛力。
5	室內溫控 模型	開發室內氣溫、輻射溫度、濕度和預測平均投票 (Predicted Mean Vote, PMV) 指數的綜合狀態空間模型 (state-space model, SSM)，適用於快速即時多目標優化。	與傳統的 ON/OFF 控制相比，MPC 控制器可以實現高達 19.4 % 的節能。當 MPC 控制器調整為以熱舒適為主導，在大多數辦公時間內達到中性 PMV 指數時，與傳統的 ON/OFF 控制相比，該系統仍可節省約 6 % 的能量。

新加坡推動綠建築分為三個層級（圖 13），低層級(Positive Energy)、中層級(Zero Energy)、高層級(Super Low Energy)。BCA 於周邊場域建造（改造）示範性綠建築如圖 14，低層級為三層樓建築，淨剩餘能源大於 40%，EEI 改善大於 20%；中層級為 EEI 小於 80 kWh/m<sup>2</sup>-yr（空調區域），EEI 小於 30 kWh/m<sup>2</sup>-yr（非空調區域）；高層級(Super Low Energy)為節能大於 45%，EEI 小於 100 kWh/m<sup>2</sup>-yr。BCA 低層級-Positive Energy 綠建築場域及計畫如圖 15，2018 年完成 BCA 培訓中心的改造，利用各項技術混合冷卻系統、熱反射膜高性能玻璃、用戶界面空間設置、監控和切換負載插頭等；並也推動至新加坡各級學校的改造，引入 solarNOVA 計畫、創新降溫技術，考量使用者行為，以達熱舒適性之環境，提升能源效能成為 PES (Positive-energy School)。圖 16 左圖中層級-Zero Energy 綠建築為國立新加坡大學設計與環境學院大樓，EEI 小於 60 kWh/m<sup>2</sup>-yr，能源節省大於 60%，ETTV 小於 30 W/m<sup>2</sup>；右圖為高層級-Super Low Energy 綠建築為一動綠色辦公大樓，EEI 小於 100 kWh/m<sup>2</sup>-yr，能源節省大於 60%，並擁有智慧技術。

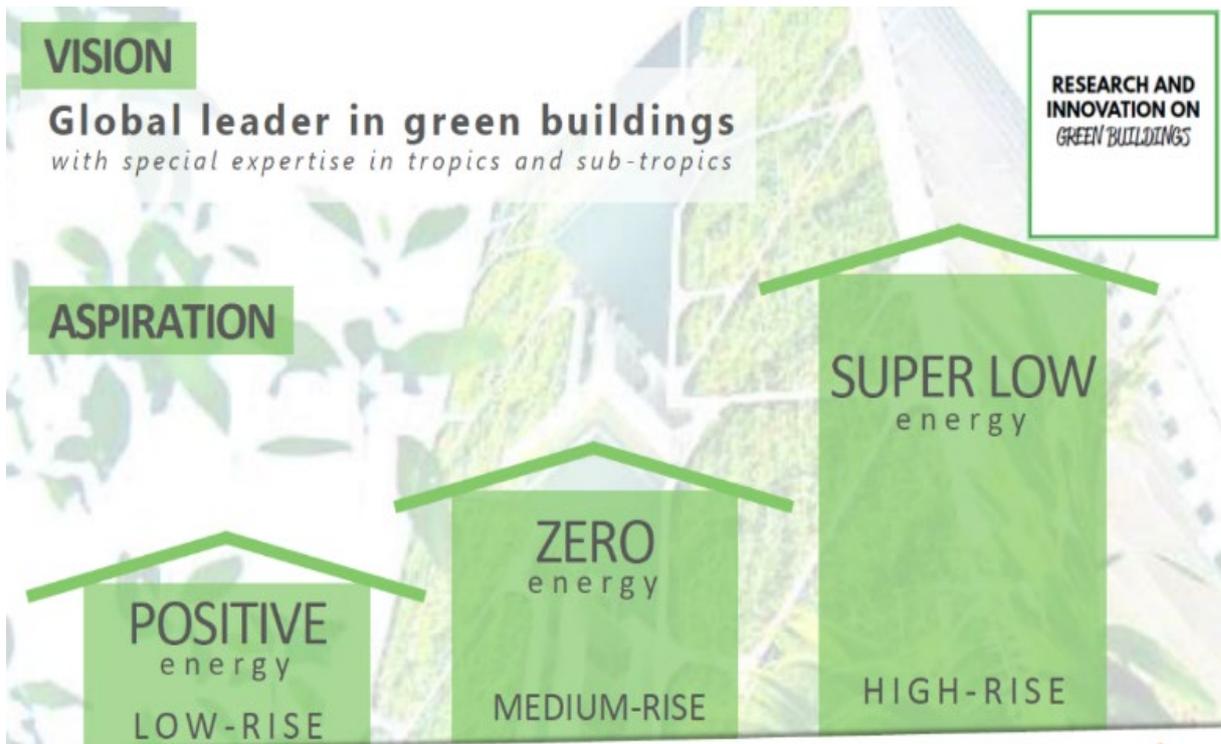


圖 13、新加坡推動綠建築三層級(Chong, 2018)

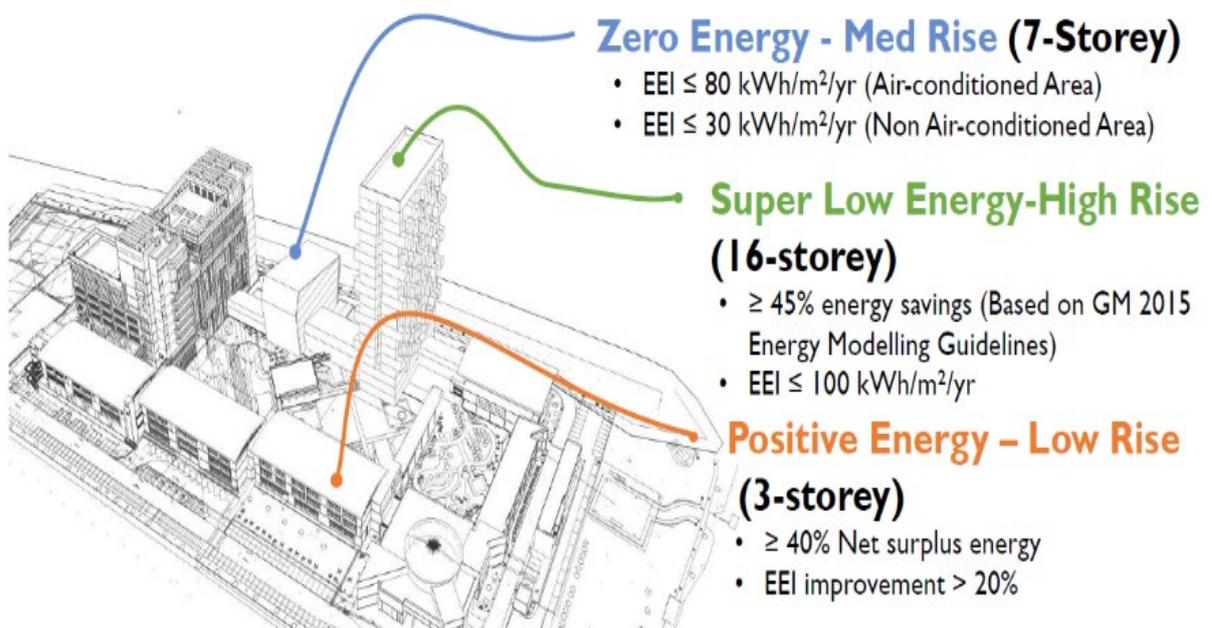


圖 14、新加坡 BCA 綠建築(Chong, 2018)

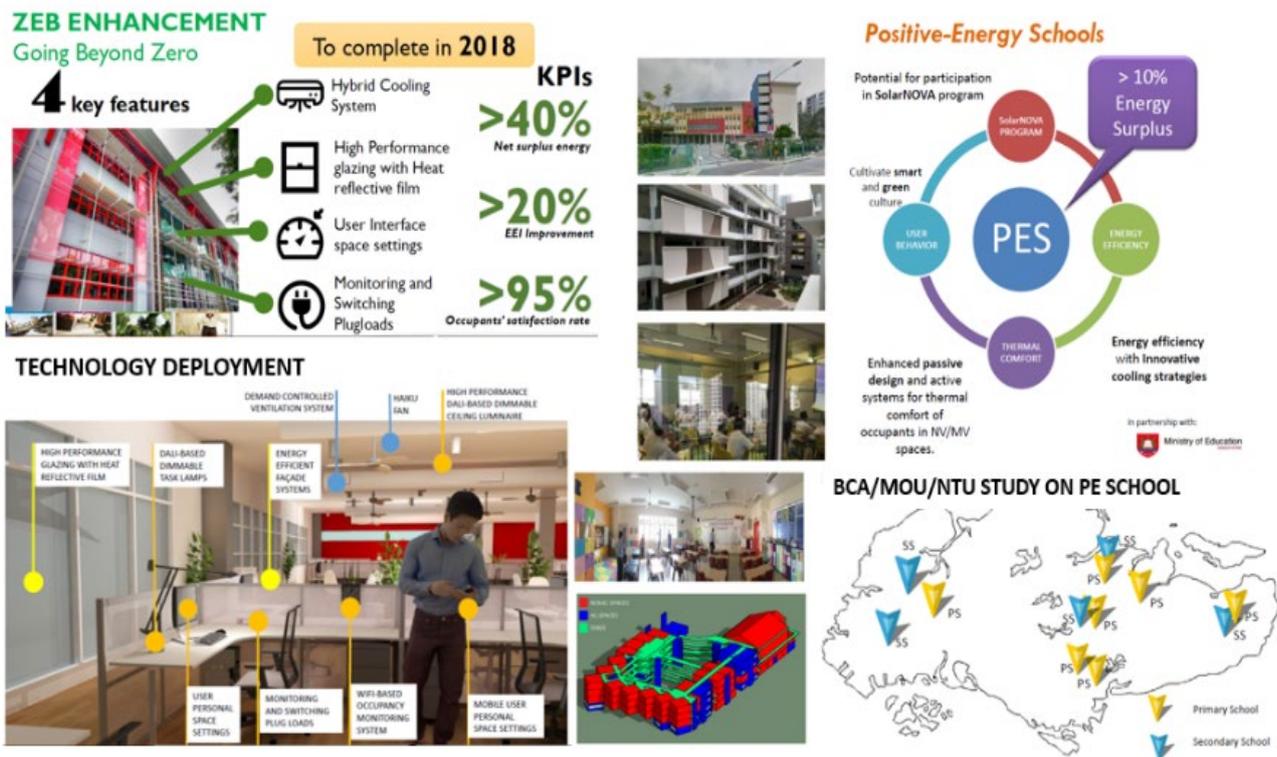


圖 15、新加坡 BCA 低層級(Positive Energy)綠建築場域及計畫(Chong, 2018)



圖 16、新加坡中高層級(Zero Energy, Super Low Energy)綠建築(Chong, 2018)

新加坡政府推出建築產業轉型藍圖，未來發展趨勢重點在於(1)綠建築、(2)製造和組裝設計(Design for manufacturing and assemble, DfMA)、(3)整合數位傳輸系統(Integrated digital delivery, IDD) (圖 17)。DfMA 設計、預鑄、組裝、設備管理整體流程(圖 18)，將原本大量依賴人力的工地建築工作轉變成在受監控工廠環

境內，預先製作結構或建築組件並整合至建築物上（圖 19），如預製建築技術 (PPVC)，預先在工廠內製作和組裝 3D 模型組件，再送往建築工地搭建，以更具效率的建築方法縮短工期，新加坡政府目標在 2020 年前達成 40% 的建築工程採用 DfMA 技術。IDD 是指借助先進的資通訊技術和智能科技，在運用建築資訊模型 3D 數位技術基礎上，使建築業的各環節更緊密連結，實現高效率合作，節省工程時間並減少建材浪費。



圖 17、新加坡綠建築發展趨勢(Chong, 2018)

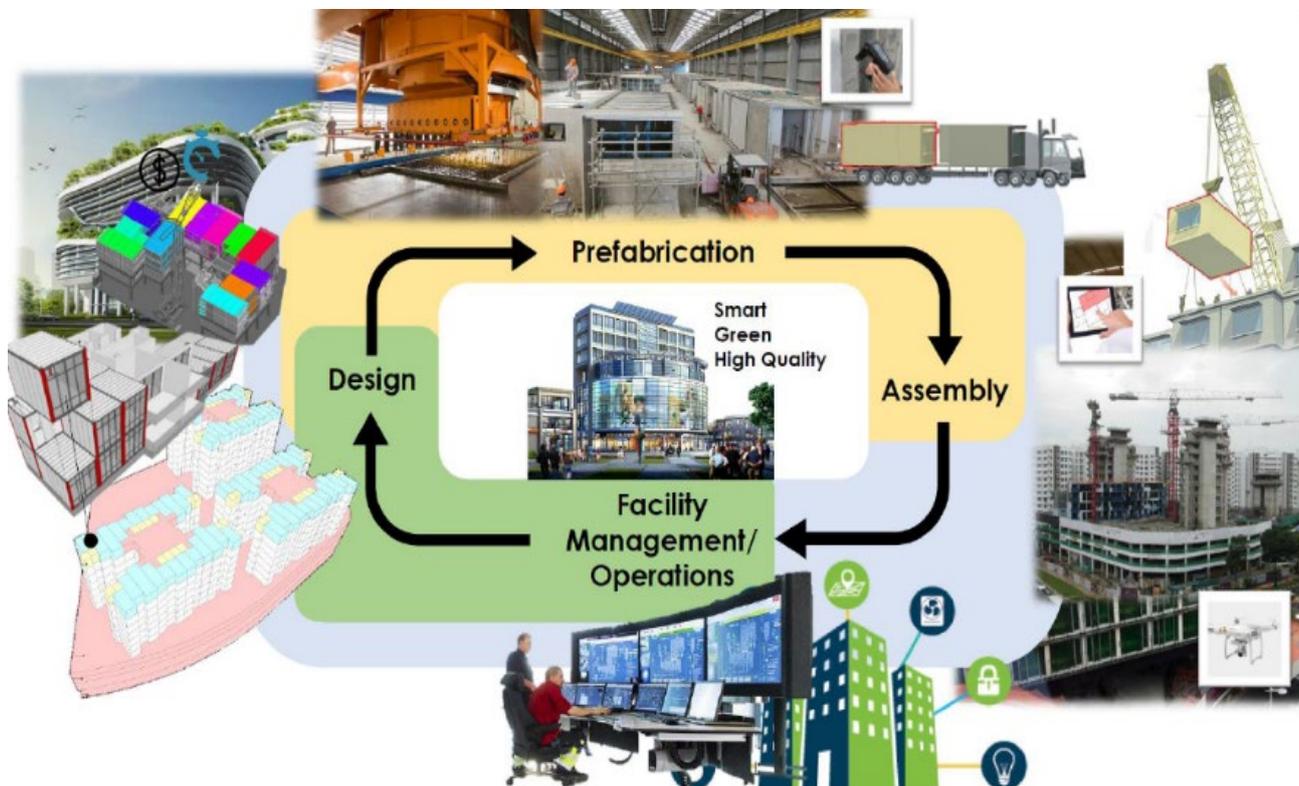


圖 18、新加坡設計、組裝、管理綠建築流程圖(Chong, 2018)



圖 19、新加坡發展以 DfMA 設計組裝綠建築(Chong, 2018)

### 參考資料

1. Ariffin, A. and Fai, L. K. (2016). Singapore opens world's first rotatable lab for tropics. Retrieved from <https://www.channelnewsasia.com/news/singapore/singapore-opens-world-s-first-rotatable-lab-for-tropics-7898490> (Sep. 25, 2018)
2. Bhunia, P. (2017). Research into four emerging energy efficient technologies at the BCA SkyLab in Singapore. Retrieved from <https://www.opengovasia.com/articles/7836-four-emerging-energy-efficient-technologies-being-explored-at-the-bca-skylab-in-singapore> (Mar. 20, 2018)
3. Bhunia, P. (2017). Research into four emerging energy efficient technologies at the BCA SkyLab in Singapore. Retrieved from <https://www.opengovasia.com/articles/7836-four-emerging-energy-efficient-technologies-being-explored-at-the-bca-skylab-in-singapore> (Mar. 25, 2018)
4. Building and Construction Authority. (2017). Percentage of Green Buildings in Singapore. Retrieved from [https://www.bca.gov.sg/Publications/BuildGreen/others/BGreen\\_12\\_2017.pdf](https://www.bca.gov.sg/Publications/BuildGreen/others/BGreen_12_2017.pdf) (December 29, 2017)
5. Building and Construction Authority. (2017). Green Mark Criteria for Existing Non-Residential Buildings. Retrieved from [https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/GM\\_ENRB\\_2017\\_full\\_criteria.pdf](https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/GM_ENRB_2017_full_criteria.pdf) (September 29, 2017)

6. Chong, T. T. Research and innovation on facades and envelop. Retrieved from <http://www.glasstechasia.com.sg/contents/file/Keynote%20AM%20-%20Tan%20Tian%20Chong.pdf> (Nov. 6, 2018)
7. Greg, Z. (2016). SkyLab in Singapore To Research Energy Efficient Building Technologies. Retrieved from <https://www.facilitiesnet.com/energyefficiency/tip/SkyLab-in-Singapore-To-Research-Energy-Efficient-Building-Technologies--37635> (Apr. 13, 2018)
8. Lamano, A.S., Yang, S., Wan, M.P., Zhou, M., Zhou, J., Babu, S., Sarvaiya, J.N., Zhang, Z., Kiran Kumar, D.E.V.S., & Krishnasayee, K. (2018, February). Energy Performance of an Integrated Automated Blinds and Dimmable Lighting System with Model-Predictive Control (MPC). Paper presented at the 4th International Conference On Building Energy, Environment, Melbourne, Australia.
9. Lee, K. L. (2016). NI partners with BCA in SkyLab Project. Retrieved from <https://www.ceasiamag.com/2016/07/ni-partners-bca-skylab-project/> (Apr. 13, 2018)
10. Yang, S., Wan, M. P., Ng, B. F., Zhang, T., Babu, S., Zhang, Z., Chen, W., & Dubey, S. (2018). A state-space Thermal Model Incorporating Humidity and Thermal Comfort for Model Predictive Control in Buildings. *Energy & Buildings*, 170, 25-39.