

# Architectural Design Exploration of Low-Exergy (LowEx) Buildings in the Tropics

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Chen, Kian Wee

**Publication date:**

2015

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010613319>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 22956

# Architectural Design Exploration of Low-Exergy (LowEx) Buildings in the Tropics

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

KIAN WEE CHEN

BA (Arch) Hons, M (Arch), National University of Singapore

born on *02.10.1986*

citizen of Malaysia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Arno Schlueter  
Chair of Architecture and Building Systems,  
Institute of Technology in Architecture (ITA),  
Faculty of Architecture ETH Zurich

Asst. Prof. Dr. Patrick Janssen  
Department of Architecture,  
National University of Singapore

2015

# Abstract

Buildings are major contributors to global energy consumption and Green House Gas (GHG) emissions. The design and construction of energy-efficient buildings is one of the key mitigation strategies in the fight against climate change. In the hot and humid climate of Singapore, 40–50% of the energy consumption of a building is used for space conditioning. Efficient space conditioning can greatly reduce the energy consumption of a building. Sensible and latent cooling are the two main cooling processes in hot and humid climate. Sensible cooling requires temperatures 14–18°C to maintain the interior temperature at 23–25°C, while latent cooling requires 8°C to dehumidify the interior air to maintain thermal comfort for the occupants. In conventional air-based space conditioning, these two processes are not separated. As a result, 8°C is used for both sensible and latent cooling.

The concept of exergy assesses the quality of the energy flow. The low-exergy (LowEx) approach aims to design cooling systems that reduce the use of high quality energy and increase the use of low quality energy, such as the use of higher temperatures that are closer to the room temperature, to provide cooling to the space. The Separation of Sensible and Latent Cooling (SSLC) splits the load by using two chillers, one chiller to provide higher temperature for sensible cooling and one for latent cooling. The consumption of electricity, which is a high quality energy, is reduced as the sensible chiller produces higher temperatures, and the latent chiller only works to dehumidify the required volume of air for ventilation and maintaining the humidity in the space.

However, there are architectural implications when these LowEx cooling systems are employed. For example, one of the major limitations of employing these systems is that the sensible load of the space needs to be low to be within the cooling capacity. LowEx cooling systems that use high temperature cooling components have a lower cooling capacity than conventional cooling systems because of the use of higher temperatures. The sensible cooling load is dependent on the solar heat gain from the envelope and on the internal load, which includes occupancy, lighting, and equipment gains. Architects are required to factor these constraints into their architectural design from the early design stages, or else it might not be feasible to employ LowEx cooling systems. The

early design stages inevitably become more demanding and complicated when architects have to factor LowEx cooling systems into their design. The objective of this research is therefore to facilitate the integration of LowEx cooling systems into the early architectural design stages.

Assuming an integrated design process during which architects work in close collaboration with the Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC) designers, a design method that consists of three main stages is proposed to achieve the objective. The first stage is the encoding stage, which in turn consists of three steps. The first step requires the HVAC designers and architects to select the LowEx cooling systems according to the HVAC system requirements and properties. The second step is to decide how to model and evaluate the systems with the architectural design. An architectural design change will affect not only the performance of the LowEx cooling systems, but also other performances, such as daylight. Thus, in the third step the design concept is formulated as a Multi-Objective Optimisation Problem (MOOP). It is then encoded into a design generation procedure, and a series of design evaluation procedures. Architects will have to balance the architectural design and the LowEx cooling systems to satisfy the requirements of multiple performances.

The encoded design schema is then used as input in the optimisation stage where an optimisation algorithm is employed. The design generation procedure is used for the generation of a population of design variants. The evaluation procedures are used to measure the performance of each design variant in the population. The optimisation process then uses a feedback procedure consisting of various mechanisms that select the best design variants from the population and automatically generate new design variants. The analysis stage is where architects explore the design variants evolved in the optimisation stage. K-means and Archetypal Analysis is employed to facilitate the data analysis process. Parallel Coordinate Plots (PCP) and 3D models are used to visualise the results. The analysis process aids architects in understanding the relationship between the architectural design and LowEx cooling systems.

A prototype tool is developed to support the execution of the design method. The prototype tool is implemented in a scientific workflow management tool. Domain-specific applications are integrated in the platform, and its graph-based interface provided flexibility for one to customise one's workflow for different projects. Three workflow templates are composed for the design method. The optimisation workflow template is composed for the encoding and optimisation stage, and the analysis workflow template for the analysis stage. The visualisation workflow template is also created to visualise the results from the analysis stage. Minimal alterations are required to customise the templates for a new design project. Finally, the design method and prototype tool are demonstrated on a case study.

The United World College South East Asia (UWCSEA) building is re-designed with the LowEx approach. The case study explores the courtyard typology. The size, dimensions, and position of the courtyard are varied for design exploration. The design concept is then encoded with the prototype tool. The optimisation algorithm generated 5000 design variants. The proposed data analysis procedure is then used to cluster the generated design variants into respective design clusters. Exemplar designs are extracted to offer a visual representation of the typical designs from each design cluster. The results show potential of the design method, where the generated design variants are separated and visualised into manageable design clusters. Architects are able to explore a large number of design variants, and be aware of the potential and limitations of the design concept. This would in turn enable the architects to balance the architectural design and LowEx cooling system to satisfy the multiple performances.

# Kurzfassung

Gebäude sind für einen großen Teil des globalen Energiekonsums und der Treibhausgasemissionen (THG) verantwortlich. Die Gestaltung und Realisierung von energieeffizienten Gebäuden ist eine der zentralen Strategien im Kampf gegen den Klimawandel. Im heißen und feuchten Klima von Singapur werden 40-50% des Energiekonsums der Gebäude für die Raumklimatisierung benötigt. Eine effiziente Raumklimatisierung kann daher den Energiekonsum eines Gebäudes drastisch reduzieren. In der Raumkühlung wird zwischen sensibler und latenter Kühlung unterschieden. Die sensible Kühlung kann mittels Temperaturen von 14-18°C erreicht werden, wohingegen für die latente Kühlung 6-8°C für die mechanische Entfeuchtung der Aussenluft benötigt wird. Bei konventioneller, luftbasierender Raumklimatisierung sind diese beiden Prozesse nicht getrennt. Als Ergebnis kommen 6-8°C sowohl für die sensible als auch die latente Kühlung zur Anwendung.

Das Konzept der Exergie beschreibt die Qualität eines Energieflusses. Der Niedrig-Exergie Ansatz (LowEx) zielt auf eine Auslegung des Kühlsystems ab, die die geringstmögliche Energiequalität für die Kühlung des Raums verwendet. Dies kann z.B. durch die Nutzung höherer Temperaturen für die sensible Raumkühlung erreicht werden. Durch die Trennung von sensibler und latenter Kühlung (SSLC) kann die Gesamtkühlleistung auf zwei verschiedene Kältemaschinen verteilt werden. Eine der Maschinen erzeugt die höhere Temperatur für die sensible Kühlung und die andere die tiefen Temperaturen für die latente Kühlung. Hierdurch kann der Konsum der hochwertigen Energieform Elektrizität reduziert werden.

Der Einsatz solcher LowEx-Kühlsysteme hat verschiedene architektonische Implikationen. Eine der primären Einschränkungen in der Verwendung dieser Systeme ist die Höhe der sensiblen Kühlleistungen. Durch die Verwendung höherer Temperaturen erreichen LowEx-Kühlsysteme eine geringere Kühlleistung als konventionelle Kühlsysteme. Die sensible Kühlleistung eines Raumes bemisst sich aus den solaren Gewinnen über die Gebäudehülle und den internen Lasten, wozu auch Wärmegewinne durch Raumbelastung, Beleuchtung und Betriebsmittel zählen. Für Architekten ist es wichtig, diese Rahmenbedingungen in ihr architektonisches Design bereits in den frühen Entwurfsphasen mit einzubeziehen, anderenfalls kann es nicht möglich sein, effiziente LowEx-

Kühlsysteme einzusetzen. Die frühen Entwurfsphasen werden dadurch unweigerlich anspruchsvoller. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist daher, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen die Integration von LowEx-Kühlsystemen in die frühen Phasen der Architekturplanung zu ermöglichen.

Unter Annahme eines integrierten Entwurfsprozesses, bei dem die Architekten eng mit den Ingenieuren der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungsgewerke (HLK) zusammenarbeiten, wird eine Designmethode bestehend aus drei Hauptphasen vorgeschlagen. Die erste Phase ist die Definitionsphase, die wiederum aus drei Schritten zusammengesetzt ist. Ingenieure und Architekten wählen das LowEx-Kühlsystem entsprechend den Rahmenbedingungen aus. Im zweiten Schritt werden die Systeme in der Architekturplanung modelliert und bewertet. Eine Änderung des architektonischen Entwurfes beeinflusst dabei nicht nur das Leistungsverhalten der Kühlsysteme sondern auch das von anderen Systemen wie z.B. das des Tageslichts. Daher wird im dritten Schritt das Entwurfsschema als multidimensionales Optimierungsproblem (MDOP) formuliert. Hierfür wird es in einem parametrischem Modell kodiert, simuliert und ausgewertet. Das architektonische Design und das Design des Kühlsystems werden aufeinander abgestimmt, um den verschiedenen Anforderungen zu genügen.

Das kodierte Entwurfsschema wird als Grundlage für die darauf folgende Optimierungsphase verwendet. Das parametrische Modell ermöglicht die automatische Erstellung vieler Designvarianten, welche anschliessend anhand der Simulationsergebnisse quantitativ und durch den Architekten qualitativ beurteilt werden können. Hierfür werden Analyseverfahren wie das Clustering nach K-Mittelwert und Archetypenanalyse verwendet. Für die Visualisierung der Ergebnisse kommen Parallel-Koordinaten Plots (PCP) und 3D-Darstellungen zum Einsatz. Der Analyseprozess und die Visualisierungen unterstützen den Architekten dabei, die Wechselwirkungen zwischen dem architektonischen Design und den LowEx-Kühlsystemen zu identifizieren und deren Auswirkungen zu berücksichtigen.

Für die Erprobung der Methode wurde ein prototypisches Werkzeug entwickelt und in einer Umgebung für wissenschaftliche Workflows realisiert. Hierfür wurden domainspezifische

Anwendungen wie z.B. Energiesimulationen und Optimierungsverfahren integriert; über die graphische Schnittstelle kann der Modellierungs- und Analyseprozess den eigenen Fragestellungen angepasst werden. Mit Hilfe des Werkzeuges wurde die Methode exemplarisch in einer Fallstudie angewendet.

Die Ergebnisse zeigen das Potential der Methode auf, Zusammenhänge zwischen architektonischen und technischen Parametern und deren Einfluss auf verschiedene Indikatoren darzustellen. Die gemäss des Schemas erzeugten Designvarianten können verschiedenen Clustern zugeordnet und visualisiert werden. Der Vergleich der Cluster zeigt die Wechselwirkung zwischen Architekturplanung, Kühlsystemen und Performance auf. Allerdings ist der Prozess in der prototypischen Form noch nicht sehr intuitiv, ebenso erfordert die Anwendung ein erhöhtes Mass an technischem Fachwissen. Um die Integration technische Systeme für den Entwurf effizienter LowEx-Gebäude noch effektiver zu gestalten soll die Methode und das Werkzeug daher in Zukunft noch weiter vereinfacht und verfeinert werden.