

# การปรับปรุงบานเกล็ดและช่องเปิดอาคารโรงงานเพื่อลดความร้อนด้วยลมธรรมชาติ

## Improvement of Louvers and Openings of Factory Building to Remove Heat through Natural Wind

ปัทมทัต เพ็ชรดี และ สุดาภรณ์ ชั่งลู่\*

Pannatat Petchdee and Sudaporn Chungloo\*

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University, Pathumthani 12121, Thailand

E-mail: chungloo@tu.ac.th\*

### บทคัดย่อ

ความร้อนสะสมในอาคารโรงงานเป็นสาเหตุของความเครียดจากความร้อนของคอนกรีตและทำให้ผลผลิตลดลง งานวิจัยนี้เล็งเห็นว่า การปรับปรุงช่องเปิดและลักษณะบานเกล็ดที่สอดคล้องกับกระแสลมธรรมชาติและแหล่งความร้อนภายในอาคารจะสามารถลดความร้อนสะสมดังกล่าวได้ วิธีการศึกษาประกอบด้วย การวัดค่าข้อมูลจริงของอุณหภูมิสูงสุดของผิวอาคาร อุณหภูมิอากาศและเครื่องจักรในอาคารโรงงาน แล้วนำข้อมูลมาป้อนเข้าสู่แบบจำลองในโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์การไหล ANSYS FLUENT 13.0 ผลการจำลองที่ได้คือ ลักษณะการไหลและอุณหภูมิของอากาศในอาคารโรงงานปัจจุบัน ผลการจำลองแสดงว่า การปรับปรุงช่องเปิดที่ผนัง หลังคา และมุมเอียงบานเกล็ดให้ผลด้านการระบายอากาศร้อนออกจากอาคารสองส่วนคือ ความร้อนในพื้นที่ทำงานและความร้อนใต้หลังคา นอกจากนี้การผสมผสานตำแหน่งช่องเปิด บานเกล็ด และหลังคาที่เหมาะสมก่อให้เกิดกระแสลมหมุนกลางอาคารที่ช่วยกันอากาศร้อนจากด้านบนและการเพิ่มอัตราการไหลออกของอากาศร้อนที่ระดับทำงาน ผลการปรับปรุงบานเกล็ดที่ผนังสามารถเพิ่มพื้นที่ช่องเปิดจาก 10% เป็น 30% ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิบริเวณทำงานลงได้ใกล้เคียงกับอากาศภายนอกคือ 32.5 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้ช่องเปิดที่หลังคาสามารถลดอุณหภูมิอากาศใต้หลังคาได้ 10-12 องศาเซลเซียส ส่งผลดีต่อการป้องกันการแผ่รังสีความร้อนลงสู่พื้นที่ใช้งาน

### Abstract

Heat accumulated in the factory building not only causes heat stress in workers but also reduces productivity. This research is aimed at improving the opening and the louvers in consistent with the natural wind and heat sources in buildings to remove heat. The study includes the measurement of the factory surface temperatures, air temperature and machinery heat and inputting into the model in ANSYS FLUENT 13.0, a computational fluid dynamic program. The simulated results show the flow patterns and temperature of the air in the building. Simulation results show that the opening positions, angle of louvers and roof form bring warm air out of the building in two parts: heat attached to roof and heat in the working area. In addition, proper combination of opening position, louvers and roof form helps prevent the hot air from the top and increasing the rate of heat flow out of work. The results show that the improvement of louvers increases wall opening from 10% to 30% and can reduce the working temperature down close to the ambient air of 32.5°C. Installation of opening on the roof can reduce the roof temperature by 10-12°C, resulting in preventing of radiative heat transfer from roof to working area.

### คำสำคัญ (Keywords)

อาคารโรงงาน (Factory Building)

การระบายอากาศด้วยลมธรรมชาติ (Natural Wind Ventilation)

บานเกล็ด (Louver)

ช่องเปิดอาคาร (Building Opening)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD)

## 1. บทนำ

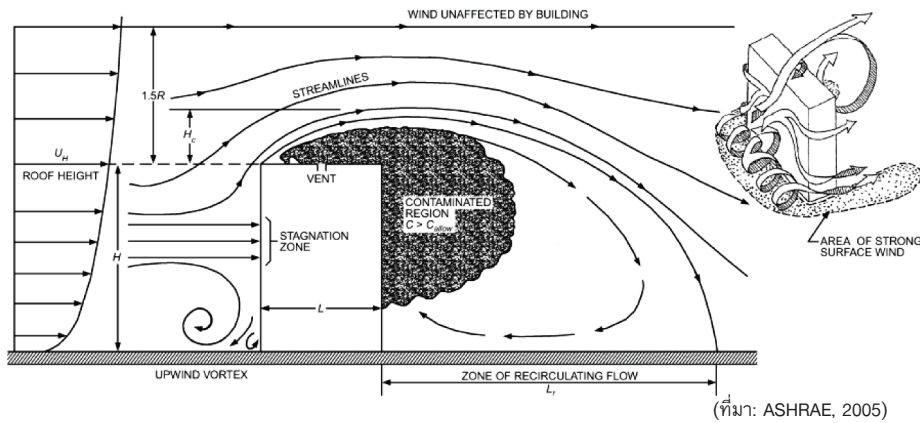
อาคารโรงงานมีแหล่งความร้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้อากาศภายในอาคารมีอุณหภูมิสูงอยู่ตลอดเวลา หากไม่ระบายออกอย่างเพียงพอ โรงงานที่มีเครื่องจักรกลหนักจำนวนมากและมีปริมาตรภายในอาคารสูง เช่น โรงงานขึ้นรูปพลาสติก โรงสีข้าว โรงงานอบแห้งผลิตภัณฑ์ เป็นต้น จะใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ เช่น ลुकหมุน บานเกล็ด และพัดลม ซึ่งพบว่ายังไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนและส่งผลเสียด้านความรู้สึกไม่สบาย และสุขภาพของคนงานในโรงงาน ค่าอุณหภูมิ 30-32 และ 34°C ในพื้นที่ทำงาน หน้า ปานกลาง และเบา ตามลำดับ เป็นระดับอุณหภูมิตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเพื่อให้คนงานทำงานได้โดยไม่เกิดอันตราย (Royal Thai Government Gazette B.E. 2003, 2003, pp. 1-11) เมื่อพิจารณาจากสภาพอากาศทั่วไปของกรุงเทพมหานครที่มีอุณหภูมิอากาศในเวลากลางวันเฉลี่ยประมาณ 32.5°C (Thai Meteorological Department, 2008) งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้การระบายอากาศร้อนออกจากโรงงานด้วยลมธรรมชาติ เพื่อการลดอุณหภูมิภายในอาคารให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกและอยู่ในเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้น โดยอาศัยช่องเปิดและบานเกล็ดที่เหมาะสม ผลการศึกษาจะแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาคาร ความดันและทิศทางของลมรอบและในอาคารตัวอย่างและอาคารจำลองที่ปรับปรุงแล้ว

งานวิจัยก่อนหน้าด้านการระบายอากาศวิธีธรรมชาติ อาจแบ่งได้เป็นสองระบบ (1) การระบายอากาศจากภายในสู่ภายนอกด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิด้วยหลักการของการลอยตัวของอากาศร้อนขึ้นที่สูง และ (2) การระบายอากาศด้วยลมธรรมชาติผ่านช่องเปิด เช่น หน้าต่าง ประตู ช่องลม เป็นต้น เนื่องจากโรงงานเป็นอาคารกลางแจ้งที่มีแหล่งความร้อนภายในซึ่งมีทั้งการลอยตัวของอากาศร้อนและมีการนำลมธรรมชาติเข้ามาพัดผ่านภายในอาคาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการระบายอากาศทั้งสองระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแรกเกี่ยวกับปริมาตรอากาศที่ระบายออกต่อเวลา ( $m^3/s$ ) ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด อุณหภูมิอากาศภายใน และอุณหภูมิอากาศภายนอก (Bansal, 1998; Hirunlabh et al., 2001; Gan, 2006) การทดลองในแบบจำลองย่อส่วน (scaled model) เป็นที่นิยมมากเช่นเดียวกับการใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหล (CFD) และการสร้างห้องทดลองจริง แบบจำลองย่อส่วน ได้แก่ ผู้ใช้อาคารที่อยู่บนพื้นของห้องโถงหรือห้องประชุม เป็นแหล่งกำเนิดของอากาศร้อนของอากาศที่จะลอยขึ้นสูง

แล้วออกสู่ปล่องหรือโถงสูง (Chenvidyakarn, 2005) การระบายอากาศออกทางปล่องรังสีดวงอาทิตย์ (solar chimney) ซึ่งใช้ระบบการลอยตัวของอากาศร้อนจากผนัง ตั้งจากการทดลองจริงในเขตอากาศร้อนและในฤดูร้อน (Chungloo, 2007) ผลการทดลองแสดงว่า การระบายอากาศในลักษณะนี้เป็นไปอย่างช้า ๆ เมื่อไม่ได้คำนึงถึงการรบกวนจากลมภายนอก และอาจจะไม่เพียงพอต่อผู้ใช้งาน เนื่องจากระดับความเร็วอากาศน้อยกว่า 0.5 เมตร/วินาที หากมีการรบกวนจากลมภายนอกการระบายอากาศจะเปลี่ยนไปเป็นระบบที่สองที่อาศัยการพัดผ่านของลม ลมรอบอาคารในแนวระนาบเมื่อผ่านวัตถุทึบ (bluff body) มีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมดคือ เป็นรูปเกือกม้า (horse shoes) ในแนวตั้งอากาศที่ไหลปะทะตั้งฉากกับอาคาร พบว่าที่ระดับความสูงช่วง 1/3-2/3 ส่วนของความสูงของอาคารจากพื้นจะมีทิศทางไหลลง และ 1/3 ส่วนบนสุดของอาคารจะมีทิศทางไหลขึ้น (ASHRAE, 2005) ดังรูปที่ 1 ผนังด้านปะทะลมจะเกิดความกดอากาศสูง ขณะที่ด้านหลังอาคารเกิดความกดอากาศต่ำ โดยระยะของการเกิดความกดอากาศต่ำจะมีระยะประมาณ 2-7 เท่าของความยาวอาคารจึงจะมีความเร็วลมเท่ากับความเร็วลมก่อนปะทะอาคาร (Malaragns, 1982) การดักลมให้เข้าสู่อาคารโดยพัฒนาองค์ประกอบของอาคาร เช่น ผนังยื่น (wing wall) ช่วยสร้างความแตกต่างของความกดอากาศระหว่างช่องเปิดทำให้อากาศไหลเข้าสู่ห้องได้มากขึ้น (Chungloo & Tienchutima, 2012) ข้อสังเกตประการหนึ่งในกรณีศึกษาที่ประกอบด้วยเครื่องจักรที่พื้นจำนวนมากตั้งอยู่ที่พื้นนั้น ต้องการการระบายอากาศและความร้อนด้วยอัตราสูง นอกจากนี้ อุณหภูมิพื้นผิวอาคารโรงงานโดยเฉพาะหลังคาที่โดยเฉลี่ยย่อมมีค่าสูงกว่าอากาศโดยทั่วไปอยู่ประมาณ 10°C (Srivanit & Hokao, 2012) เนื่องจากการรับและความร้อนสะสมในวัสดุจึงจำเป็นต้องถูกกำจัดออกไปจากอาคารโดยเร็วด้วยการใช้ลมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิผิววัสดุ การอาศัยเฉพาะระบบแรกนั่นคือ ระบบการลอยตัวของอากาศร้อนขึ้นที่สูง อาจจะไม่เพียงพอและการพัดผ่านของอากาศร้อนออกจากพื้นที่ใช้งานด้วยแรงลมน่าจะเป็นทางเลือกที่ให้ประสิทธิผลสูงกว่า ซึ่งภายในอาคารโรงงานที่ระบายอากาศด้วยลมธรรมชาตินี้ควรจะมีค่าอุณหภูมิอากาศเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายนอก

## 2. ผลการสำรวจอาคารโรงงานในปัจจุบัน

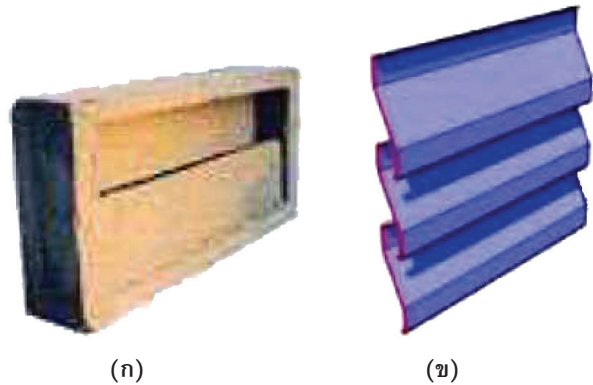
จากการสำรวจพบว่า อาคารโรงงานเก่านิยมใช้งานช่องเปิดที่ผนังตำแหน่งสูง เช่น บริเวณส่วนบนของผนัง และบริเวณผนังที่สูงจากระดับพื้นประมาณ 2.0 เมตร ในปัจจุบัน



รูปที่ 1 ลักษณะของลมที่ปะทะอาคารในทิศตั้งฉากกับผนัง

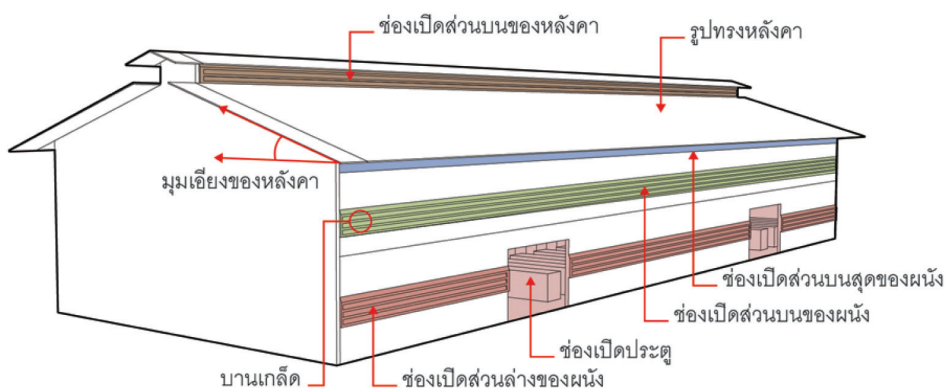
ตำแหน่งของช่องเปิดลดระดับลงโดยอยู่สูงจากระดับพื้นประมาณ 0.50 เมตร เพื่อให้ระบายอากาศให้กับคนทำงาน ขนาดของช่องเปิดจะมีความยาวตลอดแนวอาคารและมีความสูงประมาณ 1.50 เมตร หรือเพื่อให้ผ่านมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดคือ พื้นที่ช่องเปิดต้องไม่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนัง นอกจากนี้ การออกแบบในเรื่องการไหลของอากาศทั้งภายในและภายนอกอาคารเป็นส่วนที่ไม่ได้คำนึงถึงมากนัก โดยจะคำนึงถึงการคำนวณอัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศ (air change rate) เพื่อให้ผ่านเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดเท่านั้น ช่องระบายอากาศที่พบได้แก่ช่องลมที่มีความกว้างของช่องลมผ่านเพียง 2.0-2.5 เซนติเมตร และบานเกล็ดทำจากแผ่นกระเบื้องที่มีช่องลมผ่านกว้าง 10.0 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2

ผลการวัดค่าอุณหภูมิผิวภายในอาคารและหลังคาอาคารโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (infrared thermometer) ความคลาดเคลื่อน  $\pm 1.0$  องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเท่ากับ 32.5 และ 50°C ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิอากาศภายในและภายนอกอาคารวัดได้ 33.5 และ 32.5°C ตามลำดับ อุณหภูมิผิวเครื่องจักรวัดได้ประมาณ 33°C สำหรับการจำลองเครื่องจักรค่าแหล่งความร้อนแต่ละเครื่องกำหนด



รูปที่ 2 ก) บล็อกช่องลมขนาดช่องกว้าง 0.02 เมตร กว้าง 0.19 x ยาว 0.0395 x หนา 0.075 เมตร และ ข) กระเบื้องบานเกล็ดที่ใช้กับอาคารโรงงานในปัจจุบันช่องลมกว้าง 0.10 เมตร ขนาดกว้าง 0.40 x ยาว 2.0 เมตร

ให้เท่ากับ 1500 W โดยที่ช่องเปิดในผนังของอาคารโรงงานขนาดกลางและใหญ่มีได้ 5 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งบนสุดติดกับหลังคา ตำแหน่งบนประตู ตำแหน่งบนสุดผสมกับตำแหน่งบนประตู ตำแหน่งล่างระดับประตู เปิดประตูอย่างเดียว และช่องเปิดที่หลังคา ดังรูปที่ 3 ช่องเปิดที่หลังคาเป็นรูปแบบที่ไม่แพร่หลายในปัจจุบัน แต่พบว่ามีความสำคัญในการระบายความร้อนจึงนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ รวมทั้งมุมเอียงของหลังคาและหลังคาโค้ง จึงพบว่า มีผลต่อการกักความร้อนด้านบนสุดของอาคาร



รูปที่ 3 อาคารตัวอย่างที่มีช่องเปิดตำแหน่ง บนสุดของผนัง (ติดชายคา) ช่องเปิดส่วนบนของผนัง ช่องเปิดบนสุดผสมกับบนประตู ตำแหน่งล่างระดับประตู เปิดประตูอย่างเดียว และช่องเปิดที่หลังคา

### 3. การตั้งค่าแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS FLUENT

#### 3.1 แบบจำลองอาคาร

รูปที่ 4 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือ รูปทรง หลังคาและตำแหน่งของช่องเปิด รวมทั้งหมด 20 กรณี โดยกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

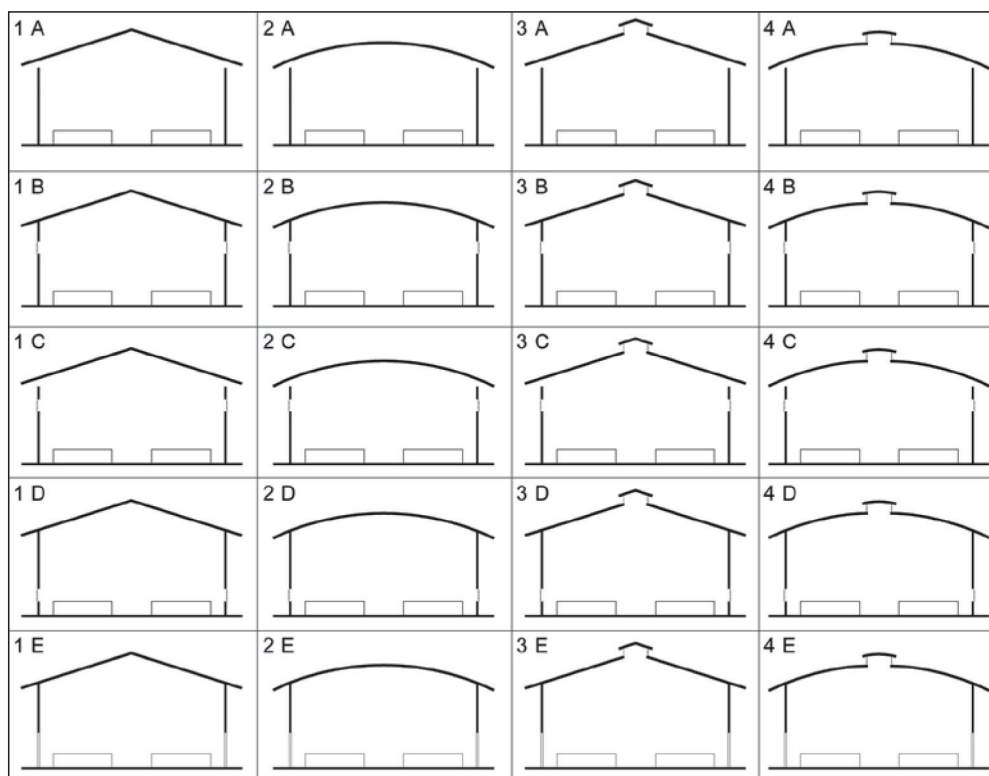
- 1 คือ หลังคาจั่ว
- 2 คือ หลังคาโค้ง
- 3 คือ หลังคาจั่วที่มีช่องเปิดด้านบน
- 4 คือ หลังคาโค้งที่มีช่องเปิดด้านบน
- A คือ ตำแหน่งช่องเปิดส่วนบนสุดของผนัง
- B คือ ตำแหน่งช่องเปิดส่วนบนของผนัง
- C คือ ตำแหน่งช่องเปิดส่วนบนและบนสุดของผนัง
- D คือ ตำแหน่งช่องเปิดส่วนล่างของผนัง
- E คือ ใช้ประตูอย่างเดียว

นั่นคือ หลังคาแบบ 1-4 จะสามารถมีองค์ประกอบด้านผนังคือ ช่องเปิดต่าง ๆ ได้ 5 แบบ อาคารตัวอย่างมีขนาดกว้าง 20 เมตร x ยาว 58 เมตร x สูง 10 เมตร มุมเอียงหลังคา 15 องศา ความสูงของจั่ววัดจากบนคาน

เท่ากับ 3.08 เมตร ความสูงหลังคาโค้งเท่ากับ 2.10 เมตร อาคารตัวอย่างไม่มีการบดบังจากอาคารโดยรอบและมีทิศทางลมตั้งฉากกับผนังด้านยาว 58 เมตร ซึ่งมีช่องเปิดติดตั้งอยู่ วัตถุประสงค์ของอาคารตัวอย่างคือเพื่อใช้ศึกษาผลของลมวนรอบ ๆ อาคารต่อการระบายอากาศ และทิศทางการเคลื่อนที่ของลมที่เข้ามาภายในอาคาร ซึ่งเป็นกรณีศึกษาทั่วไปสำหรับอาคารในที่ตั้งใด ๆ ความสูงช่องเปิดหลังคาเท่ากับ 0.5 เมตร บานเกล็ดที่ใช้เป็นกระเบื้องที่มีช่องลมผ่านกว้าง 10 เซนติเมตร ตามรูปที่ 2 ข

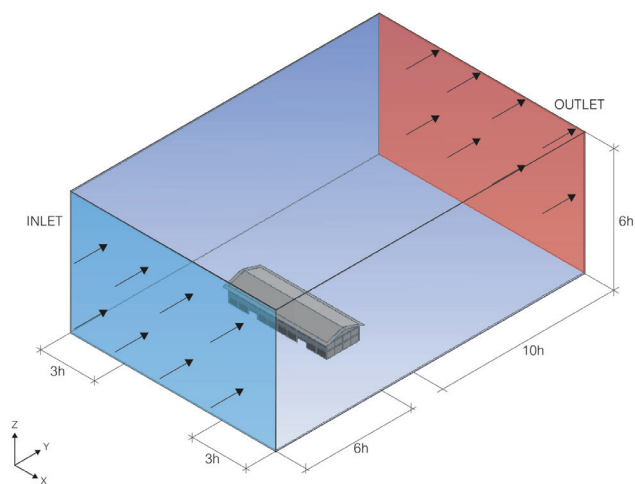
#### 3.2. การตั้งค่าการคำนวณและสภาวะเงื่อนไข

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Rhinoceros 4.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ในคอมพิวเตอร์ สร้างแบบจำลองอาคาร และใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 13.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์การไหลจำลองการไหลของอากาศและการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารซึ่งดูจากอุณหภูมิในจุดต่าง ๆ ขนาดของอาคารจำลองในโปรแกรม ANSYS Fluent 13.0 มีระยะห่างจาก inlet ถึงผนังด้านหน้าอาคารเท่ากับ 6h ระยะห่างของผนังด้านหลังอาคารถึง outlet เท่ากับ 10h และระยะห่าง

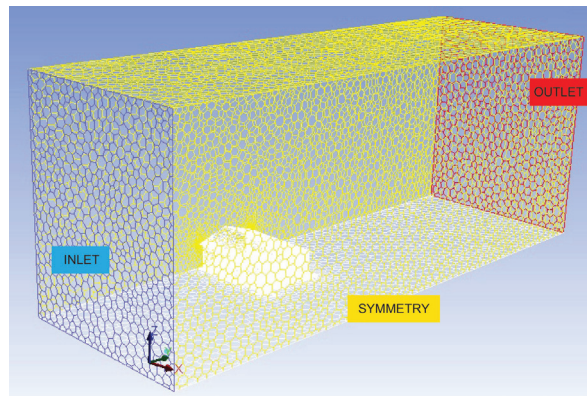


รูปที่ 4 อาคารโรงงานที่มีรูปแบบหลังคาจั่วและหลังคาโค้งทั้งแบบไม่มีช่องเปิดบนหลังคา (รูปแบบ 1 และ 2) และมีช่องเปิดบนหลังคา (รูปแบบ 3 และ 4) ประกอบกับช่องเปิดที่ผนัง 5 ตำแหน่ง (A)-(E)

ของผนังด้านข้างอาคารถึงผนังด้านข้างของโดเมนเท่ากับ  $3h$  โดยที่  $h$  คือความสูงของอาคาร ซึ่งระยะดังกล่าวเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการจำลองการไหลภายนอกวัตถุตันเต็มโดเมนในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Defraeye et al., 2010) ยกเว้นระยะด้านข้าง ซึ่งงานวิจัยนี้ปรับลดลงจาก  $6h$  เป็น  $3h$  เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะจำลองเพียงครึ่งอาคารและเป็นอาคารโปร่ง การทดสอบระยะด้านข้างที่น้อยที่สุดและให้ผลลมโอบรอบอาคารเท่าเดิม ได้แก่ ระยะ  $3h$  ลมที่ inlet เป็นโปรไฟล์ที่มีความเร็วลมสูงสุดที่ความสูง  $10$  เมตรเท่ากับ  $1.17$  เมตร/วินาที ดังรูปที่ 5 โมเดลอาคารที่ใช้ในการทดลองด้วยโปรแกรมจะทำการแบ่งครึ่งอาคาร ขนาดของอาคารใช้ขนาดกว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง เท่ากับ  $20$  เมตร  $\times$  ยาว  $58$  เมตร  $\times$  สูง  $10$  เมตร และกำหนดลักษณะของเซลล์ (cell) ที่ใช้ในการทดลองให้มีลักษณะหกเหลี่ยม (รูปที่ 6) ให้มีความหนาแน่นเซลล์มากที่บริเวณใกล้กับผนังและทางเข้าออกจากอาคาร ข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรมแสดงไว้ในตารางที่ 1 เช่น ระเบียบการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- $\epsilon$  RNG (renormalization group) และสมการการปรับความดันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปบูสซิเนส (Boussinesq) เป็นโมเดลที่นิยมใช้ทั่วไปในการจำลองพลศาสตร์การไหลที่เกี่ยวข้องกับการลอยตัวของอากาศร้อน (Chungloo, 2007) สภาวะเงื่อนไขของการจำลอง ได้แก่ อุณหภูมิผิว อุณหภูมิอากาศและแหล่งความร้อนจากเครื่องจักรที่ได้จากการสำรวจอาคารในปัจจุบัน การศึกษาครั้งนี้ กำหนดให้ลมพัดในทิศตั้งฉากกับโรงงานเท่านั้นและให้อุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารเท่ากับ  $32.5^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติ และโดเมน (Domain) ในโปรแกรม ANSYS FLUENT 13.0



รูปที่ 6 เซลล์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 รายการจำลองพลศาสตร์การไหลของอากาศและข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรม ANSYS FLUENT

| การจำลองพลศาสตร์การไหล                                                                                    | ข้อมูลที่ป้อน       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ขนาดโดเมน (x, y, z)                                                                                       | 60 x 180 x 60       |
| จำนวนเซลล์                                                                                                | 790,584 – 1,829,886 |
| ชนิดของโมเดลคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน                                                                        | k- $\epsilon$ RNG   |
| ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (x, y, z) ( $\text{m/s}^2$ )                                              | 0, 0, -9.81         |
| ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ ) สำหรับการคำนวณโมเดลของ Boussinesq                                 | 1.225               |
| ค่าตัวประกอบ Relaxation ของการคำนวณ ความดัน ความหนาแน่น Body Forces โมเมนตัม และ Turbulent Kinetic Energy | 0.3, 1, 1, 0.5, 0.8 |
| Time step (sec)                                                                                           | 360                 |
| Iteration / time step                                                                                     | 100                 |

(ที่มา: Chungloo, 2007)

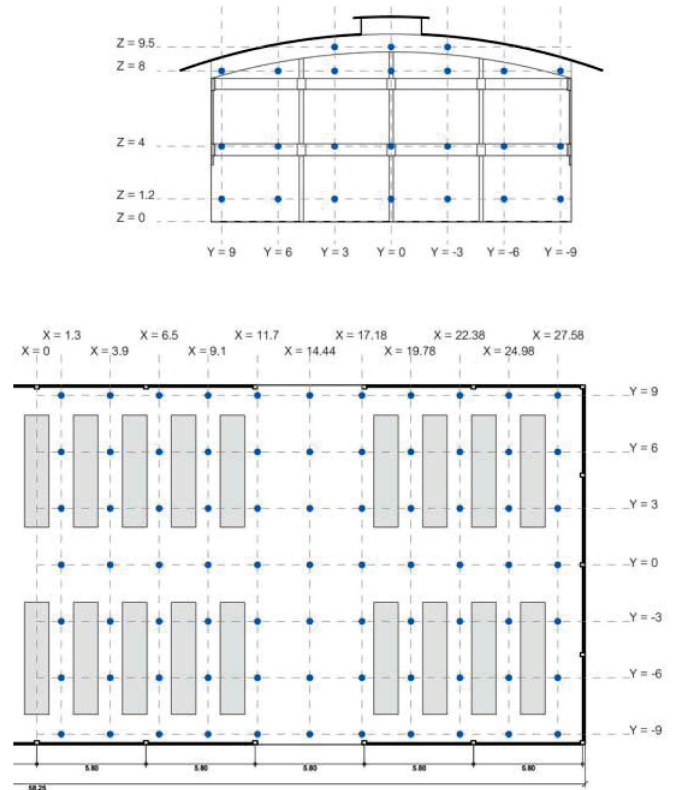
#### 4. ผลการศึกษา

ผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์การไหลนั้นจะนำมาวิเคราะห์ถึงลักษณะและทิศทางการไหลของลมที่เกิดขึ้นภายในอาคาร การวิเคราะห์อิทธิพลของลมที่มีผลในการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารจะใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตามจุดที่ได้กำหนดในการวัดค่า ดังรูปที่ 7 ค่าพลังงานสะสมที่ระดับทำงาน ได้แก่ ผลรวมของค่าพลังงานในระดับความสูง  $1.2$  เมตรจากพื้น ซึ่ง

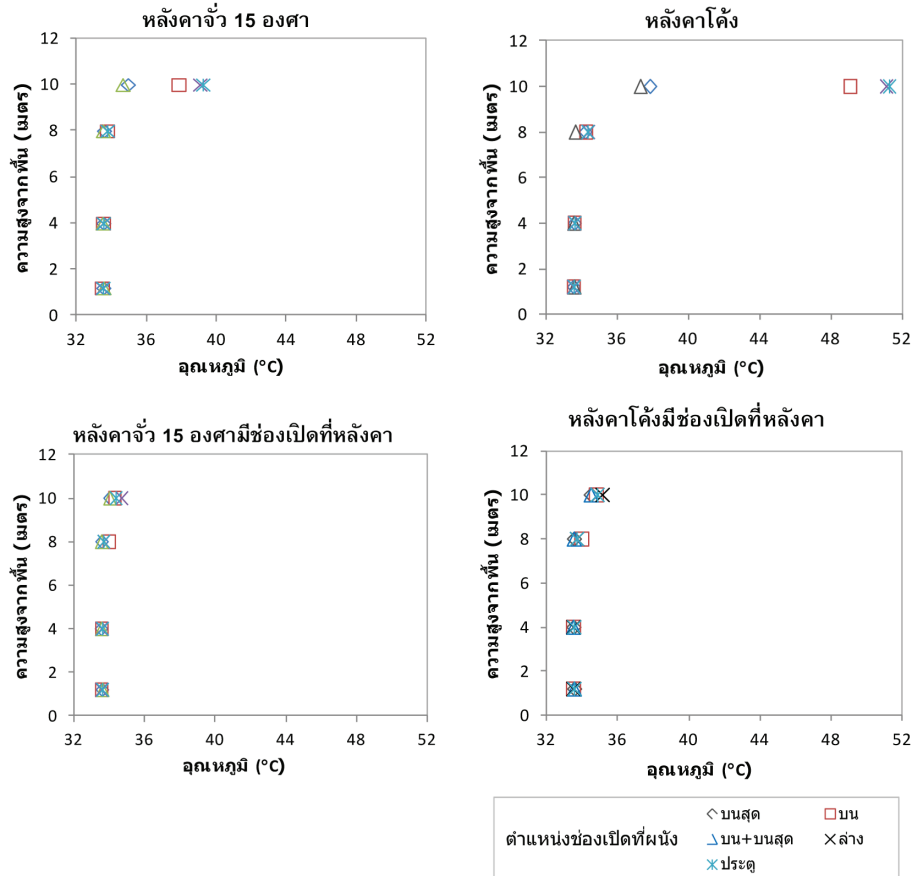
คำนวณจาก  $\sum_{i=1}^n \rho_i V_i T_{a,i}$  โดยที่  $n$  คือ จำนวนจุดที่ใช้  
คำนวณพลังงาน สะสมทั้งหมดในอาคาร  $i$  คือ จุดที่  $i$  ใน  
อาคาร  $\rho_i$  คือ ความหนาแน่นของอากาศในจุดที่  $i$  ขึ้นอยู่  
กับอุณหภูมิที่คำนวณจากโปรแกรม  $V_i$  คือ ปริมาตรอากาศ  
ของจุดที่  $i$  และ  $T_{a,i}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยในจุดที่  $i$  ผลรวมค่า  
พลังงานทุกจุดของอาคารตัวอย่างใด ๆ มีค่าสูงหมายถึงมี  
การสะสมความร้อนในอาคารสูง

#### 4.1 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในอาคารโรงงานที่มีช่องเปิด บนผนังและบนหลังคาตำแหน่งต่าง ๆ

รูปที่ 8 แสดงว่าที่ความสูงระดับทำงาน คือ 1.2 เมตร  
จากพื้น อุณหภูมิอากาศมีค่าประมาณ  $34.56^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง  
ยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานงานเบา ปานกลาง และหนัก จาก  
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ความสูง 1.2 4.0 8.0 และ 10 เมตร  
เห็นได้ชัดเห็นว่าอากาศใต้หลังคาโค้งมีอุณหภูมิอากาศ  
สูงถึง  $51.3^{\circ}\text{C}$  สูงกว่าหลังคาจั่วถึง  $12^{\circ}\text{C}$  เมื่อใช้ช่องเปิดที่  
หลังคา พบว่า อุณหภูมิอากาศที่ระดับ 10 เมตรลดลงมาอยู่  
ที่  $34.33^{\circ}\text{C}$  สำหรับหลังคาจั่วและ  $34.87^{\circ}\text{C}$  สำหรับหลังคา  
โค้ง



รูปที่ 7 จุดตรวจวัดค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแนวตั้งและแนวนอน  
สำหรับอาคารหลังคาโค้ง



รูปที่ 8 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในอาคารโรงงานหลังคาจั่วและหลังคาโค้งที่มีและไม่มีช่องเปิดหลังคา และมีช่อง  
เปิดที่ผนัง 5 ตำแหน่ง

ความร้อนบริเวณหลังคาเกิดจากการสะสมของความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์และความร้อนที่เกิดจากการลอยตัวของอากาศร้อนภายในอาคาร ความร้อนส่วนหนึ่งจะระบายออกผ่านช่องเปิดบริเวณผนัง ส่วนหนึ่งจะระบายออกช่องเปิดส่วนบนของหลังคา และอีกส่วนหนึ่งจะสะสมอยู่บริเวณพื้นที่ใต้หลังคา หลังคาโค้งและหลังคาที่มีมุมเอียงต่ำจะไม่มีบริเวณสำหรับให้ความร้อนสะสมส่งผลให้ความร้อนแผ่ลงด้านล่างเท่า ๆ กันทั่วบริเวณใต้หลังคาทำให้อุณหภูมิอากาศสูง ดังรูปที่ 9 ดังนั้น อาคารโรงงานไม่ควรสร้างด้วยหลังคาที่มีมุมเอียงต่ำโดยเฉพาะในกรณีที่หลังคาไม่มีช่องเปิดด้านบน เนื่องจากพื้นผิวหลังคาอุณหภูมิสูงขนาดกว้างและแผ่รังสีความร้อนลงมาสู่พื้นที่ทำงานด้านล่าง

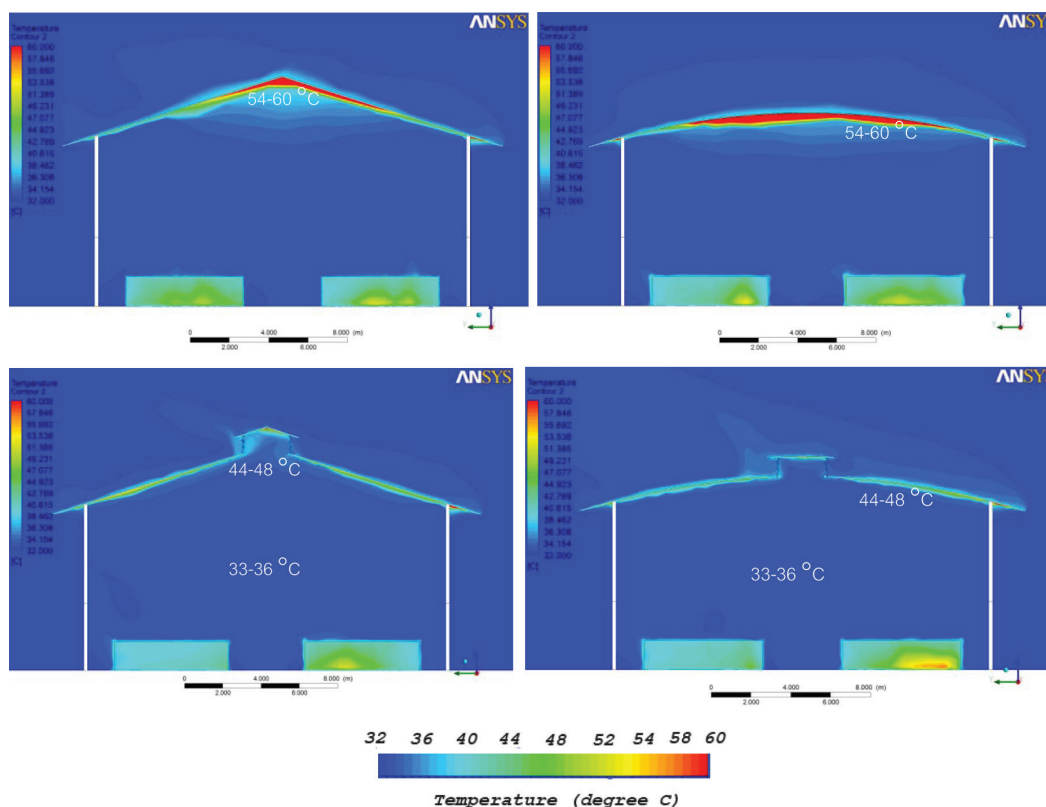
#### 4.2 พลศาสตร์การไหลกับการระบายอากาศของอาคารโรงงาน

ความร้อนบริเวณพื้นที่ทำงานเกิดจากเครื่องจักรที่แผ่ความร้อนออกมาแล้วเกิดการสะสมในบริเวณพื้นที่ทำงานโดยไม่อาจจะระบายออกจากอาคารได้ทางช่องเปิด ผลการจำลองแสดงว่า ลมที่เข้ามาภายในอาคารจะมีทิศทางวนกลับทำให้เกิดการปะทะกันของลมส่งผลให้อุณหภูมิ

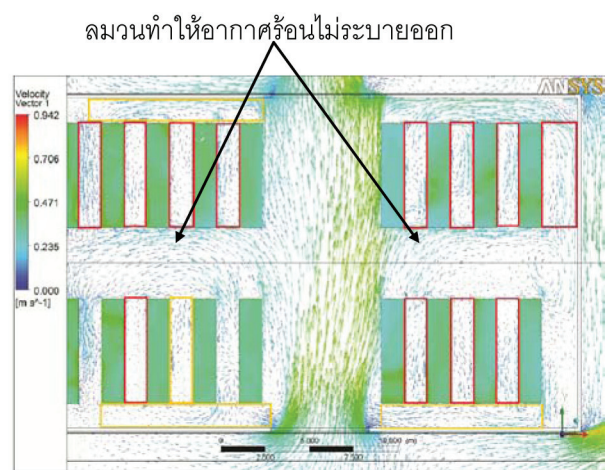
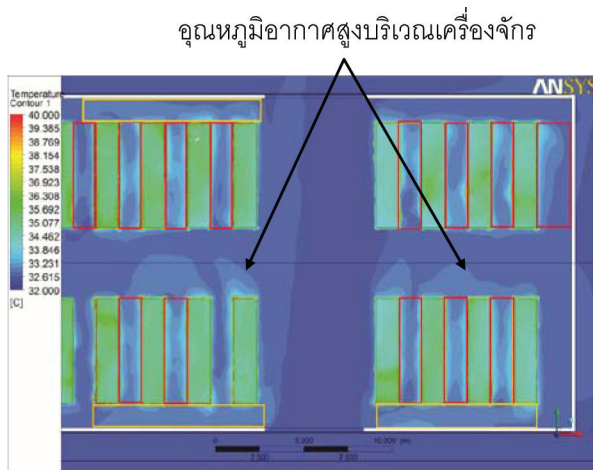
สูงในบริเวณพื้นที่ทำงานคือ ระหว่างเครื่องจักรกับเครื่องจักร ดังรูปที่ 10 นอกจากความร้อนจะสะสมบริเวณพื้นที่ทำงานแล้วยังสะสมบริเวณผนังด้านลมเข้าเนื่องจากทิศทางของลมที่วนกลับส่งผลให้ความร้อนไม่สามารถระบายออกภายนอกผ่านช่องเปิดที่มีอยู่ในปัจจุบันได้

##### 4.2.1 การเคลื่อนที่ของลมภายในอาคาร

ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมภายในอาคารเป็นผลมาจากตำแหน่ง ขนาด และสัดส่วนของช่องเปิดที่ผนังอาคาร ผลการจำลองแสดงว่า ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมภายในอาคารนั้นจะมีทิศทางวนกลับเนื่องมาจากสัดส่วนช่องเปิดที่ประตูปกับช่องเปิดที่ผนังบานเกล็ดมีความแตกต่างกันมากทำให้ลมที่เข้าทางประตูเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดทิศทางของลมภายในอาคาร เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอากาศที่ผ่านช่องเปิดที่ประตูปกับผนังบานเกล็ดทางด้านลมเข้าพบว่า ปริมาณลมที่เข้าทางประตูมากกว่าลมที่เข้าทางผนังบานเกล็ดถึง 6.3 เท่า และปริมาณลมที่ออกจากอาคารทางประตูมากกว่าผนังบานเกล็ดถึง 7.3 เท่า ปัจจัยที่ส่งผลให้ปริมาณลมที่ผ่านช่องเปิดแตกต่างกัน คือ 1) ขนาดของช่องเปิด 2) ลักษณะของบานเกล็ด 3) การปะทะของลมที่ด้านหน้าอาคาร และ 4) ลมวนที่เกิดบริเวณหลังอาคาร



รูปที่ 9 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 13.0 แสดงว่าอุณหภูมิใต้หลังคาโค้งมีบริเวณกว้างกว่าหลังจั่ว และการมีช่องเปิดที่หลังคาทำให้อุณหภูมิลดลง



รูปที่ 10 การสะสมความร้อนระหว่างเครื่องจักรทำให้อุณหภูมิในระดับทำงานสูง และการเกิดลมวนในบริเวณเครื่องจักรและใกล้ผนัง

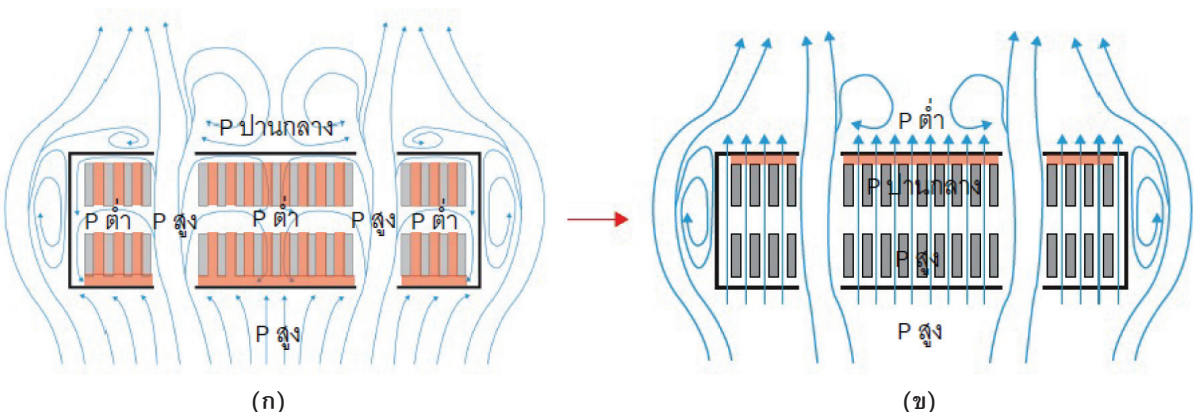
จากตารางที่ 2 ในช่วงกลางอาคารคือ ช่วง 0–1.5 เมตร และ 1.5–6.5 เมตร จากกลางอาคาร ความเร็วลมที่ทางเข้าอาคารมากกว่าความเร็วลมที่ออกจากอาคาร เนื่องจากอิทธิพลจากลมวนที่ด้านหลังอาคารดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศออกนอกอาคารลดลงโดยเฉพาะบริเวณด้านหลังอาคารช่วงกลางอาคาร (ตารางที่ 2) ดังนั้นการเลือกตำแหน่ง ขนาด และสัดส่วนของช่องเปิดจึงเป็นเรื่องที่ควรให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะส่งผลต่อการระบายอากาศภายในอาคารมากที่สุด

ตารางที่ 2 ความเร็วลมเข้าและออกจากอาคาร

| ระยะแกน x<br>(m.) | พื้นที่<br>ช่องเปิด<br>(m <sup>2</sup> ) | ความเร็ว<br>ลมเข้า<br>(m/s) | ความเร็ว<br>ลมออก<br>(m/s) |
|-------------------|------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 0.00 – 1.50       | 0.27                                     | 0.28                        | 0.004                      |
| 1.50 – 6.50       | 0.9                                      | 0.26                        | 0.08                       |
| 6.50 – 11.58      | 0.91                                     | 0.27                        | 0.23                       |
| 11.58 – 17.12     | 19.43                                    | 0.39                        | 0.32                       |

#### 4.2.2 การเคลื่อนที่ของลมภายนอกอาคาร

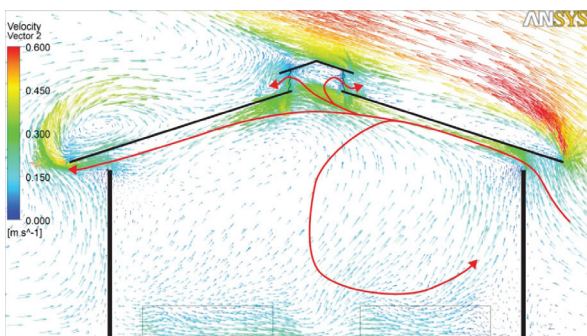
เมื่อลมปะทะอาคารจะเกิดการเบี่ยงเบนออกทางด้านข้างอาคารและจะเกิดการวนกลับบริเวณด้านหลังอาคาร การที่ลมออกจากประตูมีความเร็วมากกว่าช่องเปิดช่วงกลางอาคารส่งผลให้ขอบเขตการวนกลับของลมลดเหลือเฉพาะบริเวณส่วนกลางของผนังด้านหลังอาคาร ดังรูปที่ 11ก ซึ่งการเกิดลมวนดังกล่าวจะเป็นการลดประสิทธิภาพในการระบายอากาศของลมภายในออกสู่ภายนอก การลดความร้อนบริเวณพื้นที่ทำงานควรจะให้ตำแหน่งช่องเปิดอยู่ส่วนล่างของผนัง ซึ่งเป็นระดับเดียวกับระดับทำงานและควรปรับปรุงลักษณะบานเกล็ดของช่องเปิดเนื่องจากเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันและส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของลมภายในอาคาร สิ่งสำคัญคือการออกแบบให้ลมสามารถเข้าภายในอาคารได้ง่ายซึ่งจะเป็นการเพิ่มความดันบริเวณผนังด้านปะทะลม (รูปที่ 11ข) เมื่อความดันบริเวณนี้เพิ่มขึ้นและผนังด้านทางออกมีความดันต่ำจะทำให้ลมมีการเคลื่อนที่ในลักษณะไหลผ่าน (cross ventilation) ซึ่งจะช่วยลดการสะสมความร้อนบริเวณพื้นที่ทำงานได้



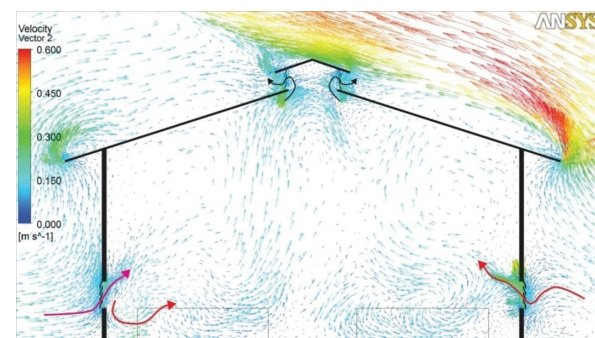
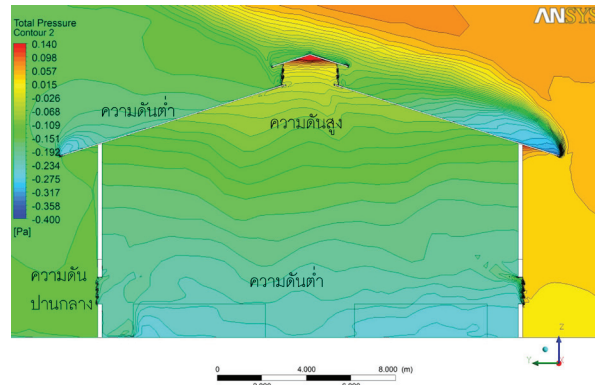
รูปที่ 11 ลมที่ปะทะ ก) อาคารทั่วไปเกิดลมวนกลับด้านหลังและภายในอาคาร เนื่องจากความดันอากาศภายในต่ำกว่าด้านหลังจึงไม่ระบายออก และ ข) อาคารที่ได้ปรับปรุงช่องเปิดช่วงกลางอาคารทำให้ความดันในอาคารสูงขึ้น

#### 4.2.3 ตำแหน่งของช่องเปิดกับการระบายอากาศ

ตำแหน่งของช่องเปิดจะส่งผลต่อทิศทางของลมที่เกิดขึ้นภายในอาคารซึ่งการเลือกใช้ช่องเปิดบานเกล็ดในแต่ละตำแหน่งของผนังจะมีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของลมภายในอาคารที่คล้ายกันแม้จะเลือกใช้บานเกล็ดที่มีขนาดต่างกัน ในส่วนของช่องเปิดที่ตำแหน่งบนสุดของผนังจะช่วยในการลดอุณหภูมิที่สะสมบริเวณใต้หลังคาได้ดีกว่าช่องเปิดในตำแหน่งอื่น ๆ ที่ผนัง และจะมีลมส่วนหนึ่งในทิศทางวนกลับลงมาด้านล่างด้วยปรากฏการณ์เดียวกับลมที่ผ่านทางประตูและส่งผลให้เกิดการสะสมของความร้อนบริเวณพื้นที่ทำงานและยังนำเอาความร้อนบริเวณพื้นที่ใต้หลังคาารวมกับความร้อนจากเครื่องจักรด้านล่างอีกด้วย ดังรูปที่ 12 และไม่ควรใช้ช่องเปิดที่ผนังส่วนบนสุดแต่เพียงอย่างเดียว ในขณะที่ช่องเปิดที่หลังคาจะช่วยในการลดอุณหภูมิบริเวณใต้หลังคาได้ดีที่สุดดังได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 4.1 รูปที่ 13 แสดงสาเหตุของประสิทธิภาพของช่องเปิดที่หลังคา อากาศร้อนจะถูกดึงออกสู่ภายนอกเนื่องจากความดันอากาศที่ติดลบเป็นผลมาจากทิศทางลมที่เปลี่ยนไปเมื่อลมปะทะหลังคา ดังนั้นผู้ออกแบบควรเลือกใช้ช่องเปิดที่อยู่ด้านบนของหลังคาจะสามารถลดความร้อนบริเวณพื้นที่ใต้หลังคาได้ดีที่สุดและควรที่จะนำไปใช้กับรูปทรงหลังคาจั่ว เนื่องจากรูปทรงของหลังคาก็มีส่วนทำให้เกิดอากาศที่มีความดันติดลบด้วย



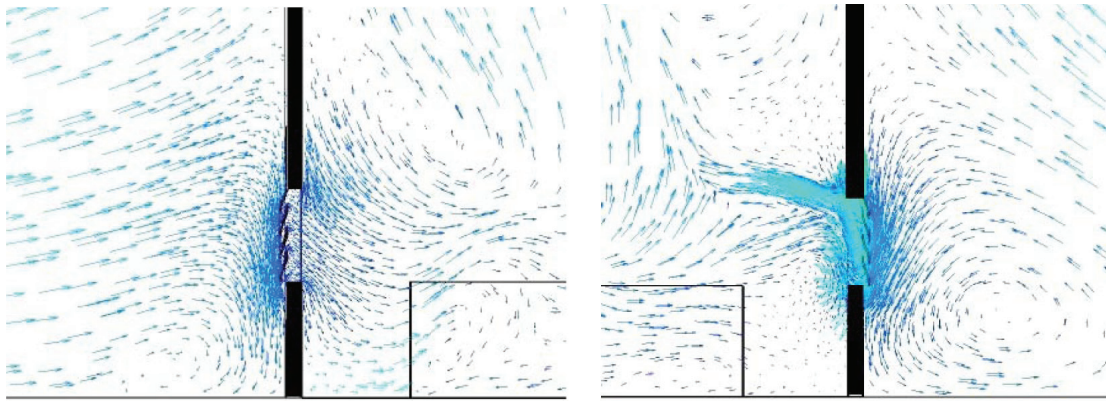
รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ของลมเมื่อเปิดช่องที่ส่วนบนสุดของผนัง ทำให้มีลมพัดความร้อนจากหลังคาลงมาด้านล่าง



รูปที่ 13 อาคารใช้งานช่องเปิดส่วนล่าง D และบานเกล็ดแบบเดิม มีความดันในอาคารต่ำกว่าด้านหลังอาคารส่งผลให้ลมด้านหน้าไม่เข้าอาคาร

#### 4.2.4 ผลการจำลองบานเกล็ดที่ใช้ในปัจจุบัน

อิทธิพลของความดันที่แตกต่างกันทั้งภายนอกและภายในอาคารส่งผลต่อการระบายอากาศ ความดันที่แตกต่างกันนั้นจะเป็นสิ่งที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของลม โดยเฉพาะลมภายในอาคาร สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภายนอกและภายใน คือ ลักษณะของช่องเปิดที่ผนังอาคาร ซึ่งสังเกตได้จากความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างความดันบริเวณผนังด้านปะทะลมกับความดันบริเวณด้านหลังของผนังด้านปะทะลมในรูปที่ 13 และนอกจากนี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมผ่านผนังด้านปะทะลมเข้าภายในอาคารผ่านช่องเปิดชนิดบานเกล็ดไม่สัมพันธ์กับลักษณะบานเกล็ด ดังรูปที่ 14 ทำให้ปริมาณลมจากภายนอกเข้าภายในอาคารได้น้อยส่งผลให้บริเวณด้านหน้าของผนังด้านปะทะลมและด้านหลังของผนังมีความดันแตกต่างกันอย่างมากและอากาศร้อนภายในอาคารระบายออกไปทางด้านหลังอาคารได้น้อย

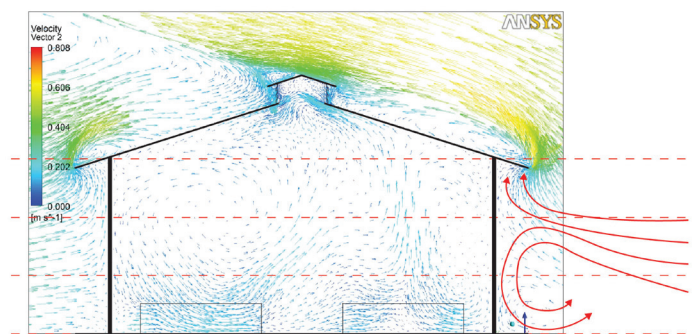


รูปที่ 14 บานเกล็ดที่ติดตั้งไม่สอดคล้องกับทิศทางไหลของอากาศทางเข้าและทางออกส่งผลให้อากาศข้างนอกไม่เข้าสู่อาคาร (ขวา) และอากาศข้างในไม่ระบายออกสู่ด้านนอก (ซ้าย)

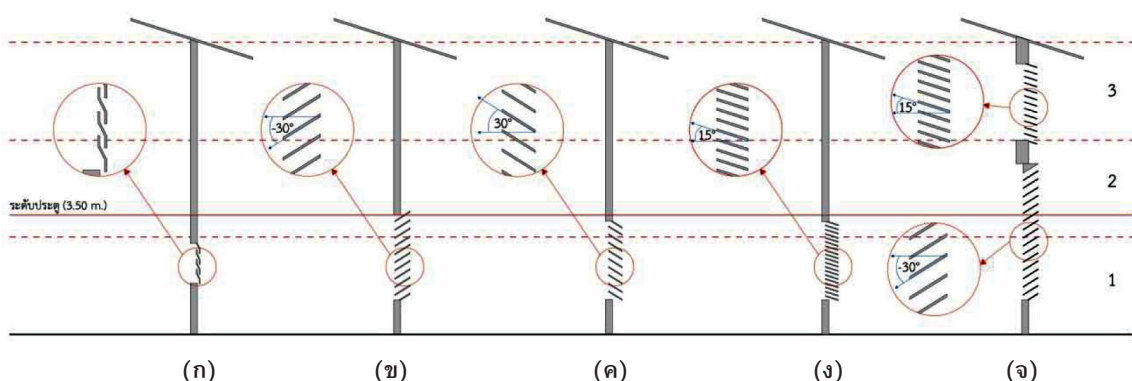
#### 4.3 ผลของการปรับบานเกล็ดต่ออุณหภูมิอากาศในโรงงาน

รูปทรงหลังคาที่ทำให้อุณหภูมิหลังคาลดต่ำสุดคือหลังคาจั่วมีช่องเปิดที่หลังคาจึงได้นำอากาศลักษณะนี้มาศึกษาต่อเพื่อหาการใช้งานร่วมกับช่องเปิดที่ผนังสัมพันธ์กับทิศทางลมรอบอาคารเพื่อให้ความดันอากาศภายในอาคารสูงขึ้น เมื่อพิจารณาลมที่ปะทะด้านหน้าอาคาร พบว่า 2 ใน 3 ของความสูงผนัง ลมจะมีทิศทางไหลลง และ 1 ใน 3 บริเวณพื้นที่ช่วงบนจะมีทิศทางไหลขึ้น (ASHRAE, 2005) ซึ่งมีทิศทางสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 15 ดังนั้นจึงกำหนดให้มีการปรับพื้นที่ช่องเปิดที่รับลมมากขึ้นโดยเปลี่ยนลักษณะของบานเกล็ดให้ลดเหลี่ยมมุมของแผ่นบานเกล็ดลงและกำหนดให้มุมเอียงของบานเกล็ดมีมุมเอียงที่สัมพันธ์กับทิศทางลม คือ 2 ใน 3 ของความสูงผนัง และ 1 ใน 3 บริเวณพื้นที่ช่วงบนของผนัง แต่ในการนำมาปรับใช้นั้นจะเลือกใช้ช่องเปิดที่ระดับ 1.0-3.5 เมตร เนื่องจากเป็นตำแหน่งของผนังส่วนล่างและมีความสูงถึงระดับประตู คิดเป็นพื้นที่ช่องเปิดที่ผนังทั้งหมด 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากการทดลองข้างต้นที่มีพื้นที่ช่องเปิดตามกฎหมาย 10 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองต่อไปจะศึกษา

กรณีมุมเอียง 0 15 และ 30 องศาเฉพาะส่วนล่างของผนังทางด้านลมเข้าและลมออก และการเพิ่มช่องเปิดตลอดความสูงของผนัง ดังรูปที่ 16 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของลมในลักษณะไหลผ่าน (cross ventilation) รวมทั้งความสามารถในการป้องกันแดดและฝน การเปรียบเทียบแต่ละค่ามุมประสิทธิภาพจะพิจารณาทั้งอุณหภูมิภายในที่ลดลงและการสะสมพลังงานความร้อนภายในที่ระดับความสูง 1.2 เมตรจากพื้นโรงงาน

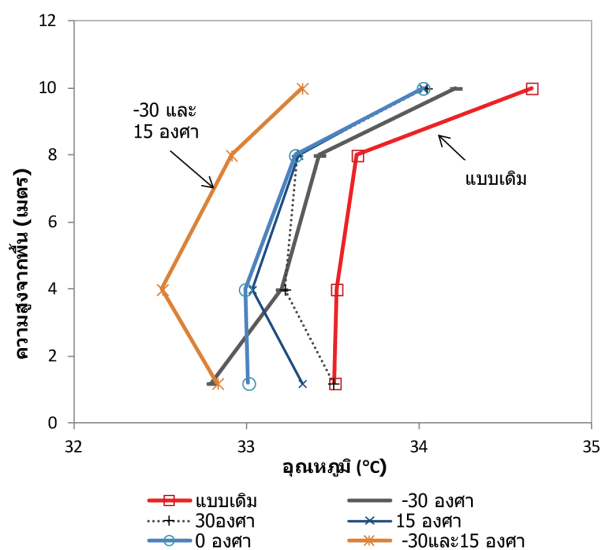


รูปที่ 15 ลมที่ปะทะอาคาร 2/3 ส่วนจะมีทิศทางลง และอีก 1/3 ส่วนจะมีทิศทางขึ้น



รูปที่ 16 การปรับมุมเอียงบานเกล็ดในช่องเปิดของผนังส่วนล่าง ก) แบบเดิม ข) มุม -30 องศา ค) มุม 30 องศา ง) มุม 15 องศา และ จ) มุม -30 ด้านล่าง และ 15 องศา ด้านบน

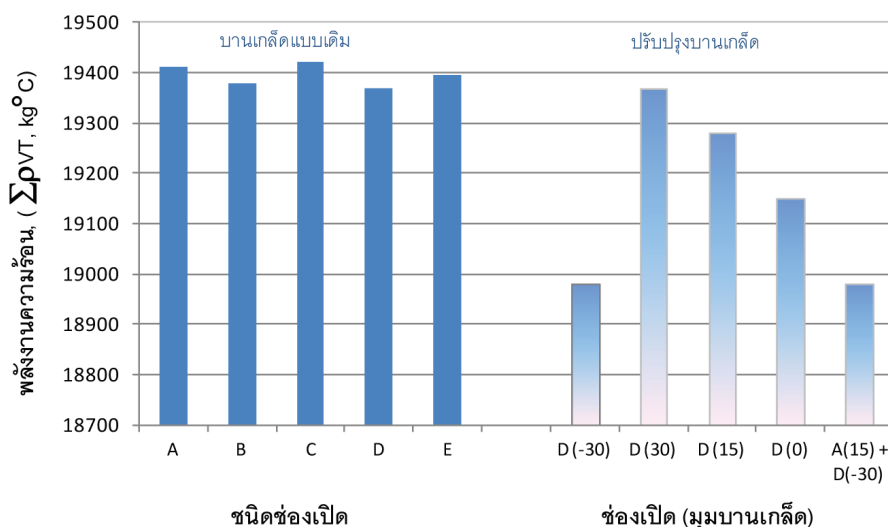
รูปที่ 17 แสดงผลของการปรับบานเกล็ดต่ออุณหภูมิอากาศภายในโรงงาน จะเห็นได้ว่าการปรับบานเกล็ดเฉพาะส่วนล่างของผนังโรงงานให้เหลื่อมมมุน้อยลงและมีมุมเอียง -30 องศาสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารได้ทั้งอาคาร การปรับบานเกล็ดให้เอียง -30 องศาที่บริเวณลดอุณหภูมิได้มากที่สุด  $0.8^{\circ}\text{C}$  ที่บริเวณพื้นที่ทำงาน และ  $0.5^{\circ}\text{C}$  ที่ระดับ 10 เมตรจากพื้น ตัวเลือกเพิ่มเติมได้แก่ การผสมระหว่างบานเกล็ดเอียง 15 องศาที่ส่วนบนกับ -30 องศาที่ส่วนล่างของผนัง ซึ่งทำให้อุณหภูมิอากาศทุกระดับความสูงมีค่าลดลงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการเปิดช่องเปิดทั้งบนและล่างในพื้นที่ทำงานก็ยังพบว่า มีอุณหภูมิ



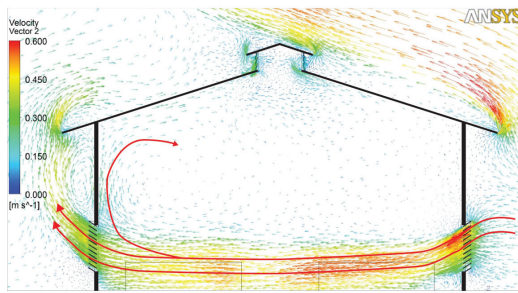
รูปที่ 17 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของอาคารโรงงานเมื่อใช้ช่องเปิดมุมเอียง -30 0 15 และ 30 องศา

เท่ากับการเปิดช่องเปิดด้านล่างด้วยมุมเอียง -30 องศาเพียงอย่างเดียว ผลการจำลองดังกล่าวนำไปสู่การเลือกใช้ช่องเปิดด้านล่างเพื่อลดอุณหภูมิอากาศในพื้นที่ทำงานและการเปิดช่องเปิดเฉพาะด้านบนหลังคา

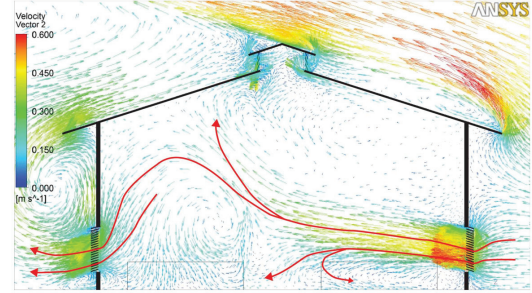
ผลการคำนวณพลังงานสะสมในบริเวณทำงาน พบว่า การใช้งานช่องเปิดที่หลังคาไม่มีผลต่อการลดอุณหภูมิอากาศในพื้นที่ทำงาน ส่วนการเปิดช่องเปิดส่วนล่างโดยใช้บานเกล็ดที่มีมุมเอียง -30 องศาลดการสะสมความร้อนได้เท่ากับการเปิดช่องเปิดทั้งผนังตามรูปที่ 18 อย่างไรก็ตามการเปิดช่องในมุมเอียง -30 องศาอาจจะมีปัญหาเรื่องการป้องกันฝน ตัวเลือกลำดับต่อไปคือการเปิดช่องเปิดที่ขนานกับพื้น (มุม 0 องศา) บานเกล็ดปรับเอียงจะพบลักษณะการแบ่งปริมาตรของอากาศร้อนในอาคารออกเป็นสามส่วนคืออากาศส่วนที่ติดกับหลังคา อากาศส่วนกลางอาคาร และอากาศที่ติดกับพื้น ดังรูปที่ 19 การแบ่งปริมาตรอากาศออกเป็นสามส่วนดังกล่าวเกิดจากความเร็วลมและความดันที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนจะเห็นได้ชัดว่า รูปที่ 19ก และ 19ข ช่องเปิดในผนังด้านล่างทำให้เกิดลมวนขนาดใหญ่ที่ส่วนกลางและส่วนบนของอาคาร ลมวนดังกล่าวจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่างอุณหภูมิผิวหลังคาอากาศภายนอกจึงสามารถป้องกันการพาความร้อนจากหลังคาได้ ในรูปที่ 19ค มีการไหลผ่านอย่างรวดเร็วเพราะเป็นบานเกล็ดมุม 0 องศา รูปที่ 19ง ลมใต้หลังคามีความเร็วสูงที่สุดทำให้เกิดลมวนขนาดใหญ่ที่ช่วงกลางของรูปตัดอาคาร ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศลดลงทั้งอาคารดังกล่าว



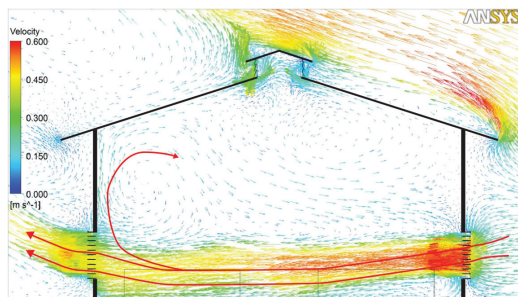
รูปที่ 18 ผลการคำนวณพลังงานความร้อนรวมที่ระดับความสูง 1.2 เมตรจากพื้นโรงงานสำหรับช่องเปิดผนังตำแหน่ง (A) บนสุด (B) บน (C) บนสุดรวมกับบน (D) ล่าง และ (E) ประตู เมื่อไม่ปรับบานเกล็ดและเมื่อปรับบานเกล็ดที่ตำแหน่งล่าง



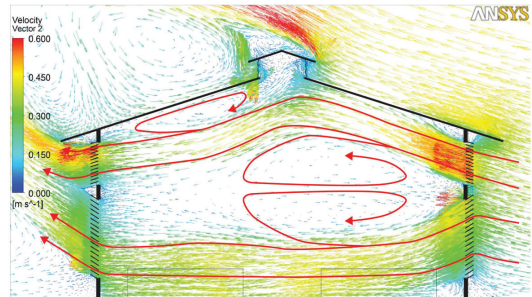
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 19 ทิศทางและความเร็วลมที่ต่างกันภายในอาคารที่มีบ้านเกล็ดล่างเอียง ก) -30 องศา ข) 15 องศา ค) 0 องศา และ ง) -30 องศา ที่ด้านล่างและด้านบน

## 5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาการไหลของอากาศรอบอาคาร และในอาคารโรงงานซึ่งเป็นอาคารขนาดใหญ่และมีความร้อนภายในอาคารสูงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS FLUENT 13.0 การศึกษาอาคารปัจจุบันโดยการสำรวจ และการจำลองในโปรแกรมพบว่า มีการระบายอากาศต่ำเนื่องจากพื้นที่ช่องเปิดน้อยเกินไปไม่เพียงพอกับความ ต้องการ และลักษณะบ้านเกล็ดแบบเดิมที่ไม่เอื้อต่อการไหลของอากาศทั้งจากภายนอกและภายใน ข้อเสนอแนะที่สำคัญในการวิจัยนี้คือ การเพิ่มพื้นที่ช่องเปิดจาก 10 เปอร์เซ็นต์ตามกฎหมายเป็น 30 เปอร์เซ็นต์โดยเฉพาะในระดับทำงาน คือ 0.0 - 1.2 เมตร และปรับปรุงใช้บ้านเกล็ดที่ไม่มีเหลี่ยมมุม เมื่อคำนึงถึงอากาศพลศาสตร์ช่องเปิดควรมีความสูง 2/3 ส่วนของความสูงทั้งหมดจากพื้น และอย่างน้อยที่สุดปรับบ้านเกล็ดให้มีมุมขนานกับพื้นจะช่วยให้อากาศไหลผ่านได้ดีและลดการสะสมพลังงานความร้อนในระดับทำงาน ทางเลือกของช่องเปิดที่สามารถลดอุณหภูมิ

ได้ดีที่สุด ได้แก่ การเปิดช่องเปิดทั้งส่วนบนและส่วนล่างของผนังจะลดอุณหภูมิอากาศได้ทั้งระดับทำงานลงได้ 0.5-0.8°C หรือใกล้เคียงกับอากาศภายนอก

ช่องเปิดที่จั่วหรือส่วนบนสุดของหลังคาโค้งเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสูงแต่ไม่ได้รับความนิยมเพราะก่อสร้างได้ยากและปัญหาการป้องกันน้ำฝน ช่องเปิดที่หลังคาดังกล่าวจะช่วยลดอุณหภูมิเฉพาะที่หลังคาซึ่งจะมีผลทางอ้อมกับการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนลงมาสู่พื้นที่ทำงานด้านล่าง ช่องเปิดที่หลังคาสูง 0.5 เมตร และใช้กระเบื้องบ้านเกล็ดแบบมีเหลี่ยมมุมช่วยป้องกันน้ำฝนได้ ช่องเปิดที่หลังคาที่ยื่นขึ้นไปจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของช่องเปิดสามารถเหนี่ยวนำอากาศร้อนภายในให้ระบายออกไปจากหลังคาได้ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอากาศใต้หลังคาลดลงได้สูงสุดถึง 12°C ในกรณีมีช่องเปิดบนหลังคาโค้ง และ 10°C ในกรณีมีช่องเปิดบนหลังคาจั่ว

## References

- Bansal, N. K., Mathur, R. & Bhandari, M. S. (1993). Solar chimney for enhance stack ventilation. *Building and Environment*, 28, 373–7.
- Chenvidyakarn, T. (2005). The Impact of pre-cooling on multiple steady states in stack ventilation. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 3, 3-20.
- Chungloo, S. (2007). *Experimental and numerical studies of solar chimney and wetted roof: an application in the hot and humid climate*. PhD thesis. Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand.
- Chungloo, S. & Tienchutima, C. (2012). The effect of wing-walls and balcony on wind induced ventilation in high-rise residential units. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 8(1), 109-120.
- DeFraeye, T., Blocken, B. & Carmeliet, J. (2010). CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 297-308.
- Gan, G. (2006). Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 38, 410–20.
- Hirunlabh, J., Wachirapuwadon, S., Pratinthong, N. & Khedari, J. (2001). New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environment*, 36, 383–91.
- Michael, G. Malaragns. (1982). *Wind in architectural and environmental design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Royal Thai Government Gazette. (2008). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง มาตรการคุ้มครองความปลอดภัยในการประกอบกิจการโรงงานที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2546 [Notification of Ministry of Industry, Subject: Measures of safety of the operator with respect to the environment in the workplace 2003]. Retrieved January 25, 2012, from <http://www.siamsafety.com>
- Srivaniit, M., & Hokao, K. (2012). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: An application for the city of Bangkok, Thailand. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 9(1) 83-100.
- Thai Meteorological Department. (2003). อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมรายชั่วโมง ปี 2542 – 2551 [Hourly data of dry bulb temperature, relative humidity and wind velocity in 1999-2008]. Retrieved August 10, 2012, from <http://www.diw.go.th>
- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers [ASHRAE]. (2001). *ASHRAE handbook-fundamentals (SI) 2001*. Atlanta: Author.