การประเมินความเสี่ยงโรคหืดกำเริบเชิงความน่าจะเป็นในเด็กภายใต้สภาวะหมอกควันข้ามพรมแดน: ข้อเสนอเกณฑ์เตือนภัยแบบพลวัตสำหรับพื้นที่ภาคใต้

Probabilistic Risk Assessment of Asthma Exacerbation in Children under Transboundary Haze: Proposed Dynamic Warning Thresholds for Southern Thailand

พิสิษฐ์ สุวรรณแพทย์[1,*]

Phisit Suvarnaphaet[1,*]

[1]คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย

[1]Faculty of Animal Sciences and Agricultural Technology, Silpakorn University, Phetchaburi IT Campus, Cha-am District, Phetchaburi, THAILAND.

*Corresponding author E-mail: suvarnaphaet_p@su.ac.th

DOI: https://doi.org/10.55674/ajhe.v1i1.5092

วันที่รับบทความ 6 ธ.ค 2568	วันที่แก้ไขบทความ 27 ม.ค 2569	วันที่ตอบรับบทความ 30 ม.ค 2569
Received: Dec. 6, 2025	Revised: Jan. 27, 2026	Accepted: Jan. 30, 2026

บทคัดย่อ

ปัญหาหมอกควันข้ามพรมแดนในภาคใต้ของประเทศไทยส่งผลกระทบเฉียบพลันต่อสุขภาพประชาชน โดยเฉพาะในกลุ่มเด็กที่มีความเปราะบางทางสรีรวิทยามากกว่าผู้ใหญ่ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความน่าจะเป็นของความเสี่ยงโรคหืดกำเริบในเด็กนักเรียน (อายุ 6-11 ปี) และเสนอเกณฑ์เตือนภัยคุณภาพอากาศที่เป็นธรรมและเหมาะสมสำหรับกลุ่มเปราะบาง การศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงแบบจำลอง (Simulation Study) ด้วยเทคนิคแบบจำลองมอนเตคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จำนวน 10,000 รอบสถานการณ์จำลอง โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากการศึกษาทางระบาดวิทยาในจังหวัดสงขลา เพื่อกำหนดพารามิเตอร์นำเข้า ได้แก่ การแจกแจงความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ค่าความเสี่ยงสัมพัทธ์ในกลุ่มเด็ก และอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์

ผลการวิจัยพบว่า ความเสี่ยงของการเกิดโรคหืดกำเริบในเด็กมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงกับระดับความเข้มข้นของฝุ่น โดยพบจุดเริ่มความไม่แน่นอนของความเสี่ยงที่ระดับ 25 $\mu g/m^3$ และความน่าจะเป็นของการเกิดโรคเพิ่มขึ้นร้อยละ 64 ที่ระดับ 50 $\mu g/m^3$ นอกจากนี้ ปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงในภาคใต้ยังมีผลร่วมที่ทำให้ความเสี่ยงสูงขึ้น การศึกษานี้จึงเสนอแนะให้โรงเรียนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องปรับใช้เกณฑ์เตือนภัยแบบพลวัตโดยควรงดกิจกรรมกลางแจ้งสำหรับเด็กกลุ่มเสี่ยงทันทีที่ค่าฝุ่นสูงกว่า 25 $\mu g/m^3$ แทนการใช้เกณฑ์มาตรฐานทั่วไป เพื่อยกระดับความปลอดภัยและความยุติธรรมทางสุขภาพให้กับเยาวชนในพื้นที่

คำสำคัญ: โรคหืดกำเริบ, ฝุ่น PM2.5, หมอกควันข้ามพรมแดน, แบบจำลองมอนเตคาร์โล, กลุ่มเปราะบาง

Abstract

Transboundary haze episodes in Southern Thailand pose acute health risks, particularly to children who are physiologically more vulnerable than adults. This study aimed to assess the probabilistic risk of asthma exacerbation in school-aged children (6–11 years) and propose equitable air quality warning thresholds. A simulation study utilizing the Monte Carlo Simulation technique with 10,000 iterations was conducted. Secondary input parameters were derived from a referenced epidemiological study in Songkhla province, incorporating the distribution of daily PM2.5 concentrations, age-specific Odds Ratios (ORs), and the influence of relative humidity.

The results indicated a non-linear relationship between PM2.5 levels and asthma exacerbation risk. The onset of risk uncertainty was identified at 25 $\mu g/m^3$, and the probabilistic risk increased by 64% at 50 $\mu g/m^3$compared to baseline. Furthermore, high relative humidity was found to amplify these risks significantly. The study recommends that schools and relevant authorities adopt dynamic warning thresholds for vulnerable children when PM2.5 levels exceed 25 $\mu g/m^3$, rather than relying on general public standards. This approach aims to enhance safety and promote health equity for the youth in the region.

Keywords: Asthma exacerbation, PM2.5, Transboundary haze, Monte Carlo simulation, Vulnerable group

©2026 Sakon Nakhon Rajabhat University reserved

1. บทนำ

มลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เป็นภัยคุกคามทางสุขภาพที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของประชากรทั่วโลก[1, 2] สำหรับประเทศไทย แม้ภาพรวมคุณภาพอากาศในภาคใต้จะดีกว่าภูมิภาคอื่น[3] แต่ในความเป็นจริง พื้นที่นี้กลับต้องเผชิญวิกฤต "หมอกควันข้ามพรมแดน" จากไฟป่าในประเทศเพื่อนบ้านเป็นประจำทุกปีในช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มิถุนายน-กันยายน) ซึ่งเป็นปัญหาที่รุนแรงและควบคุมได้ยาก จากข้อมูลสถิติพบว่า ในบางปีค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 พุ่งสูงขึ้นอย่างเฉียบพลันเกินกว่า 100 μg/m^3 และแช่ตัวอยู่นานนับสัปดาห์ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลกหลายเท่าตัว[4, 5] สถานการณ์วิกฤตดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่อกลุ่มเปราะบาง โดยเฉพาะผู้ป่วยโรคหืด (Asthma) ซึ่งไวต่อสิ่งกระตุ้นทางอากาศ[6] การศึกษาล่าสุดในจังหวัดสงขลาโดย Varopichetsan et al. [6] ยืนยันว่า ยอดผู้ป่วยเด็กวัยเรียน (6-11 ปี) ที่ต้องเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลด้วยอาการโรคหืดกำเริบ มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับช่วงเวลาที่มีหมอกควันหนาแน่น[7] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่มักประเมินความเสี่ยงโดยใช้ "ค่าเฉลี่ยทางสถิติ" หรือใช้ค่าตรวจวัดรายวันเพียงค่าเดียวมาคำนวณผลกระทบ[8] วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถสะท้อนความแปรปรวนของสภาพอากาศและความไม่แน่นอนของปัจจัยทางระบาดวิทยาได้อย่างครอบคลุม ทำให้เกิด "ช่องว่างขององค์ความรู้" (Gap of Knowledge) ในการประเมินความเสี่ยงระดับวิกฤต หรือโอกาสที่จะเกิดผลกระทบรุนแรงต่อเด็กรายบุคคลที่มีความเปราะบางแตกต่างกัน[9]

เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว การวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ "แบบจำลองมอนเตคาร์โล" (Monte Carlo Simulation) ซึ่งเป็นเครื่องมือการคำนวณขั้นสูง[10] เข้ามาช่วยสังเคราะห์ข้อมูลระบาดวิทยาเพื่อประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น โดยจุดเด่นสำคัญของแบบจำลองมอนเตคาร์โล คือความสามารถในการจัดการกับความไม่แน่นอนของตัวแปรนำเข้า (Input Parameters) ผ่านการจำลองสถานการณ์ที่เป็นไปได้จำนวนมหาศาลจากการสุ่มค่าการแจกแจงความน่าจะเป็น[11] วิธีนี้ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่ามีความแม่นยำสูงสำหรับการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากสิ่งแวดล้อมที่มีความซับซ้อน[12, 13] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสู่ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการกำหนดเกณฑ์เตือนภัยที่เป็นธรรมและทันต่อสถานการณ์สำหรับเด็กนักเรียนในพื้นที่ภาคใต้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนา แบบจำลองเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Model) ของการเกิดโรคหืดกำเริบในเด็กนักเรียนกลุ่มเปราะบาง (อายุ 6-11 ปี) ภายใต้สถานการณ์หมอกควันข้ามพรมแดน โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองมอนเตคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ร่วมกับข้อมูลทางระบาดวิทยา

2.2 เพื่อประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็นของผลกระทบต่อสุขภาพที่ระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ต่าง ๆ ร่วมกับปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของความเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยในเด็ก

2.3 เพื่อเสนอเกณฑ์เตือนภัยคุณภาพอากาศ (Warning Thresholds) แบบพลวัตที่เหมาะสมและเป็นธรรมสำหรับโรงเรียนในพื้นที่ภาคใต้ และใช้เป็น แนวทางสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในการงดกิจกรรมกลางแจ้งหรือมาตรการปิดสถานศึกษา เพื่อคุ้มครองสุขภาพเด็กอย่างทันสถานการณ์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณโดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation Study) ด้วยแบบจำลองมอนเตคาร์โล (Monte Carlo Simulation: MCS)[7] เพื่อประเมินความน่าจะเป็นของความเสี่ยงทางสุขภาพ โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) จากการศึกษาทางระบาดวิทยาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่แล้ว โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 แหล่งข้อมูลและการกำหนดพารามิเตอร์นำเข้า (Data Sources and Input Parameters)

ผู้วิจัยใช้ข้อมูลฐาน (Baseline Data) จากการศึกษาแบบ Case-Crossover ใน พื้นที่จังหวัดสงขลา ของ Varopichetsan et al.[6] เหตุผลที่เลือกจังหวัดสงขลาเป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่เศรษฐกิจหลักของภาคใต้ตอนล่างที่มีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศและฐานข้อมูลสุขภาพที่ครอบคลุม อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ด่านหน้า (Sentinel Site) ที่ได้รับผลกระทบจากหมอกควันข้ามพรมแดนอย่างชัดเจนและต่อเนื่อง

ในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยได้กำหนดการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution) สำหรับตัวแปรนำเข้าดังนี้

1) ความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 รายวัน กำหนดการแจกแจงข้อมูลแบบ Log-normal Distribution เพื่อจำลองลักษณะข้อมูลที่มีการกระจายตัวเบ้ขวา (Right-skewed) ซึ่งสอดคล้องกับธรรมชาติทางฟิสิกส์ของข้อมูลความเข้มข้นมลพิษในอากาศ[14] โดยอ้างอิงค่าเฉลี่ย (μ) ที่ 18.2 $\mu g/m^3$ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) 7.9 $\mu g/m^3$ โดยจำลองค่าให้ครอบคลุมตั้งแต่วันที่อากาศดีมาก จนถึงวันที่มีค่าฝุ่นสูงสุดเพื่อสะท้อนเหตุการณ์หมอกควันข้ามพรมแดน

2) ปัจจัยเสี่ยงในกลุ่มเป้าหมาย (Susceptibility Parameters) มุ่งเน้นกลุ่มเด็กอายุ 6-11 ปี ซึ่งเป็นกลุ่มเปราะบาง ในการจำลองผู้วิจัยกำหนดค่า อัตราส่วนออดส์ (Odds Ratio: OR) โดยใช้วิธีสุ่มค่า (Random Sampling) จากช่วงความเชื่อมั่น 95% (95% CI) ของค่า OR ที่ระบุในเอกสารอ้างอิง[6] ซึ่งครอบคลุมผลกระทบแบบล่าช้า (Lagged effects) ในช่วง 6-7 วันหลังการสัมผัสฝุ่น

3) ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Co-factors) นำตัวแปรความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) เข้ามาร่วมคำนวณ โดยกำหนดการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ (Normal Distribution) อ้างอิงค่าเฉลี่ยที่ 76.9% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.4% และกำหนดสัมประสิทธิ์ความเสี่ยงเพิ่มขึ้นในวันที่ความชื้นสูง เนื่องจากพบความสัมพันธ์เชิงบวกต่อการกำเริบของโรค [6]

3.2 การสร้างและดำเนินการแบบจำลองบน Google Colab (Simulation Setup)

การจำลองสถานการณ์ดำเนินการผ่านแพลตฟอร์ม Google Colab (Google Colaboratory) โดยใช้ภาษา Python ในการเขียนชุดคำสั่งและประมวลผลข้อมูล มีขั้นตอนหลักดังนี้

1) การสร้างสถานการณ์จำลอง (Scenario Generation) ทำการสุ่มค่าตัวแปร (Stochastic Sampling) ตามการแจกแจงที่กำหนดในข้อ 3.1 จำนวน 10,000 รอบ (Iterations) เพื่อให้มั่นใจว่าผลลัพธ์มีความแม่นยำและลู่เข้าสู่ค่าความน่าจะเป็นที่แท้จริงตามหลักการปฏิบัติที่ดีสำหรับการประเมินความเสี่ยง (Principles of Good Practice for Monte Carlo Assessment)[15]

2) การคำนวณความน่าจะเป็นของความเสี่ยง (Probabilistic Risk Calculation) ในแต่ละรอบการจำลอง ระบบจะคำนวณโอกาสการเกิดโรคหืดกำเริบ ($P_{\mathbf{exacerbation}}$) โดยแปลงค่า Odds Ratio ที่สุ่มได้ให้เป็นค่าความน่าจะเป็น (Probability) ด้วยสมการมาตรฐานทางระบาดวิทยาของ Zhang และ Yu (1998)[16] ดังนี้

$$P_{Risk} = \frac{OR \times P_0}{(1-P_0)+(OR+P_0)} \quad (1)$$

โดยที่ OR คือค่าอัตราส่วนออดส์ที่สุ่มได้จากการจำลอง และ P_0 คือความน่าจะเป็นพื้นฐานของการเกิดโรค (Baseline Probability) จากนั้นทำการปรับแก้ผลลัพธ์ด้วยสัมประสิทธิ์ผลกระทบสะสมของความชื้นสัมพัทธ์

การประมวลผลและการวิเคราะห์ความไว (Result Processing and Sensitivity Analysis) ข้อมูลความน่าจะเป็นที่ได้จะถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ และทำการวิเคราะห์ความไวด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบลำดับของสเปียร์แมน (Spearman Rank Correlation Coefficient) เพื่อระบุว่าตัวแปรนำเข้าใด (PM2.5, OR, หรือความชื้น) ส่งผลกระทบต่อความผันผวนของความเสี่ยงมากที่สุด

3.3 การพิจารณาจริยธรรมการวิจัย (Ethical Consideration)

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงคำนวณและจำลองสถานการณ์ (Computer Simulation) โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิระดับมหภาค (Aggregated Secondary Data) ที่ได้จากการศึกษาทางระบาดวิทยาซึ่งได้รับการเผยแพร่สู่สาธารณะและผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยแล้ว (โครงการวิจัยต้นเรื่องได้รับการรับรองจริยธรรมการวิจัย รหัส REC 67-214-9-4 ตามที่ระบุใน Varopichetsan et al.[6] การศึกษานี้จึงไม่ได้กระทำต่อมนุษย์โดยตรงและไม่มีการเข้าถึงข้อมูลส่วนบุคคลที่ระบุตัวตนได้ จึงได้รับการยกเว้นจากการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ตามหลักสากล

4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้ได้จากการประมวลผลแบบจำลองมอนเตคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จำนวน 10,000 รอบสถานการณ์จำลอง (Iterations) เพื่อประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็นของการเกิดโรคหืดกำเริบในเด็กนักเรียนกลุ่มเปราะบาง (อายุ 6-11 ปี) ในพื้นที่ภาคใต้ โดยแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

4.1 พารามิเตอร์นำเข้าและสภาพแวดล้อมจำลอง (Simulation Parameters) จากการสังเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิทางระบาดวิทยา แบบจำลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นที่สะท้อนสภาพความเป็นจริงของพื้นที่ภาคใต้ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงและได้รับผลกระทบจากหมอกควันข้ามพรมแดนเป็นระลอก ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งได้ทำการสอบทานความถูกต้องของรูปแบบการแจกแจงข้อมูล (Probability Distribution) กับทฤษฎีทางสถิติและสิ่งแวดล้อมเพื่อความแม่นยำสูงสุด

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สถิติและตัวแปรนำเข้าสำหรับการสร้างแบบจำลองมอนเตคาร์โล

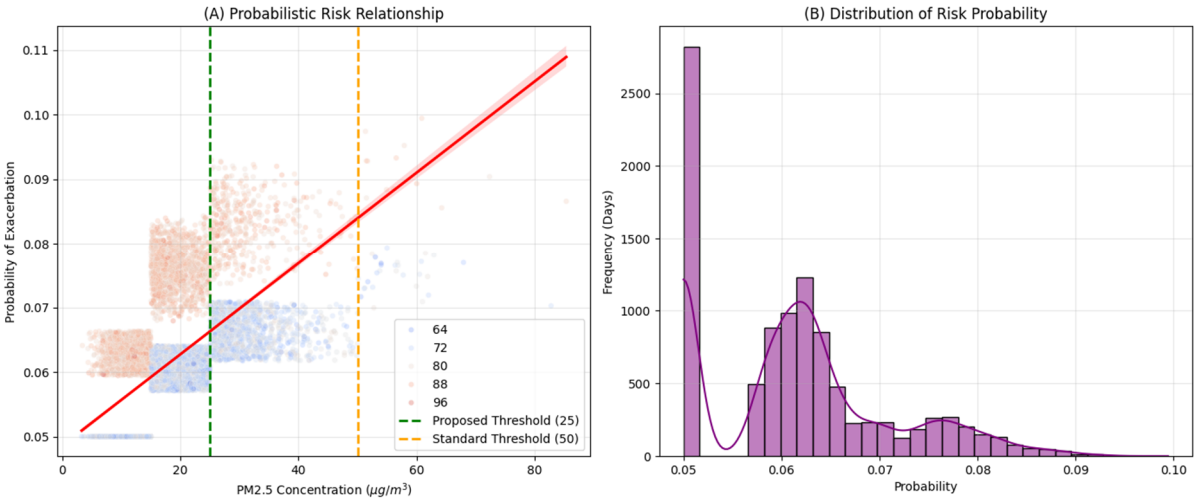
ตัวแปร (Variable)	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	รูปแบบการแจกแจง (Distribution)	แหล่งข้อมูลอ้างอิง
สภาพแวดล้อม (Environmental Factors)				
ความเข้มข้น PM2.5 รายวัน ($\mu g/m^3$)	18.2	7.9	Log-normal[14]	Varopichetsan et al.[6]
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	76.9	5.4	Normal	Varopichetsan et al.[6]
ปัจจัยเสี่ยงในเด็ก (Risk Factors in Children)				
อัตราส่วนออดส์ (Odds Ratio)	1.16 – 2.30	-	Triangular (Min=1.16, Mode=1.64, Max=2.30)*	Varopichetsan et al.[6]
พารามิเตอร์แบบจำลอง				Varopichetsan et al.[6]
จำนวนรอบการจำลอง (Iterations)	10,000	-	-	Burmaster และ Anderson[15]

หมายเหตุ: ค่า Odds Ratio ใช้การสุ่มจากช่วงความเชื่อมั่น 95% (95% CI) ตามข้อมูลระบาดวิทยา

4.2 ความสัมพันธ์เชิงความน่าจะเป็นของความเสี่ยง (Probabilistic Risk Analysis)

ผลการจำลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear Relationship) ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 และโอกาสการเกิดโรคหืดกำเริบในเด็ก ดังภาพที่ 1 (ซ้าย) กราฟแสดงให้เห็นว่า ในกลุ่มเด็กเปราะบาง ความน่าจะเป็นของความเสี่ยง (Risk Probability) เริ่มยกตัวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้นประมาณ 25 $\mu g/m^3$ (เส้นประสีเขียว) ซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่จะถึงเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปที่ 50 $\mu g/m^3$ (เส้นประสีส้ม)

นอกจากนี้ การกระจายตัวของข้อมูล (Scatter points) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ โดยในวันที่ความชื้นสูง (จุดสีเข้ม) ความเสี่ยงจะสูงกว่าปกติแม้ค่าฝุ่นจะเท่ากัน สอดคล้องกับกราฟการกระจายตัวทางขวา (ภาพที่ 1 ขวา) ที่แสดงให้เห็นว่าแม้ค่าเฉลี่ยความเสี่ยงจะต่ำ แต่มีส่วนหางของกราฟ (Tail) ที่ยืนยาวออกไปทางขวา ซึ่งสะท้อนถึงวันที่มีความเสี่ยงสูงผิดปกติ (Extreme Risk Days) อันเกิดจากปัจจัยร่วมของฝุ่นและความชื้น



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์เชิงความน่าจะเป็นระหว่างความเข้มข้น PM2.5 และความเสี่ยงโรคหืดกำเริบในเด็ก (ซ้าย) และการแจกแจงความถี่ของความเสี่ยง (ขวา) จากแบบจำลองมอนเตคาร์โล (n=10,000)

จากภาพที่ 1 (A) แสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับ PM2.5 สูงขึ้น ความเสี่ยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (เส้นแนวโน้มสีแดง) นอกจากนี้ การกระจายตัวของจุดข้อมูล (Scatter points) ที่ไล่ระดับสีจากน้ำเงินไปแดง บ่งชี้ว่าในวันที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง (จุดสีแดงเข้ม) ความเสี่ยงจะสูงกว่าปกติแม้ค่าฝุ่นจะเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 1 (B) ที่แสดงส่วนหางของกราฟ (Tail Distribution) ยื่นยาวออกไปทางขวา สะท้อนถึงโอกาสเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงสูง (Extreme Events) ภายใต้ปัจจัยร่วม

เพื่อให้เห็นภาพความเสี่ยงที่ชัดเจนในเชิงปริมาณและความไม่แน่นอน (Uncertainty) ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าสถิติความน่าจะเป็นของความเสี่ยง (Probabilistic Risk) ที่ระดับความเข้มข้น PM2.5 สำคัญต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจำลองความน่าจะเป็นของความเสี่ยง (Probabilistic Risk) และช่วงความเชื่อมั่น 95% จำแนกตามระดับความเข้มข้น PM2.5

ระดับ PM2.5 ($\mu g/m^3$)	ความน่าจะเป็นของความเสี่ยงเฉลี่ย (Mean Risk probability)	ช่วงความเชื่อมั่น 95% (95%CI) (Uncertainty Range)	การแปลผลความเสี่ยง (Interpretation)
10 (Baseline)	0.050	0.049 – 0.051	ความเสี่ยงพื้นฐาน
25 (Inflection Point)	0.050	0.049 – 0.052	จุดเริ่มเฝ้าระวังความเสี่ยง
37.5 (Intermediate)	0.053	0.050 – 0.056	ความเสี่ยงระดับปานกลาง
50 (Standard)	0.082	0.063 – 0.102	ความเสี่ยงระดับอันตราย

จากตารางที่ 2 พบว่าที่ระดับความเข้มข้น PM2.5 ที่ 25 $\mu g/m^3$ แม้ค่าเฉลี่ยความเสี่ยงจะยังใกล้เคียงกับระดับพื้นฐาน แต่ขอบบนของช่วงความเชื่อมั่น (Upper CI = 0.052) เริ่มขยับสูงกว่าขอบบนของภาวะปกติ (0.051) ซึ่งเป็นสัญญาณเตือนแรกของความไม่แน่นอน และเมื่อพิจารณาที่ระดับ 50 $\mu g/m^3$ พบว่าความเสี่ยงเฉลี่ยพุ่งสูงขึ้นเป็น 0.082 (เพิ่มขึ้นจากฐานประมาณ 64%) โดยมีโอกาสเสี่ยงสูงสุดถึง 0.102 ในกรณีเลวร้ายที่สุด ซึ่งยืนยันว่าเกณฑ์มาตรฐานเดิมอาจไม่เพียงพอสำหรับปกป้องกลุ่มเปราะบาง

4.3 ข้อเสนอเกณฑ์เตือนภัยแบบพลวัต (Proposed Dynamic Warning Thresholds)

จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงในหัวข้อ 4.2 ที่พบว่าความไม่แน่นอนของความเสี่ยงเริ่มปรากฏที่ระดับ 25 $\mu g/m^3$ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น การศึกษานี้จึงเสนอให้ปรับเปลี่ยนเกณฑ์การเตือนภัยสำหรับโรงเรียนในพื้นที่ภาคใต้ จากเดิมที่ใช้เกณฑ์เดียว (Fixed Threshold) มาเป็น "เกณฑ์ความเสี่ยงจำเพาะกลุ่มเปราะบาง" เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อเสนอเกณฑ์เตือนภัยคุณภาพอากาศและมาตรการตอบโต้สำหรับโรงเรียนในพื้นที่ภาคใต้

ระดับความเข้มข้น PM2.5 ($\mu g/m^3$)	ระดับความเสี่ยงจำลอง (Simulated Risk Level)	มาตรการแนะนำสำหรับโรงเรียน (School Action Plan)
0 – 15	**ปกติ (Baseline)**	ดำเนินกิจกรรมการเรียนการสอนและกิจกรรมกลางแจ้งได้ตามปกติ
> 15 – 25	**เฝ้าระวัง (Watch)**	แจ้งเตือนผู้ปกครองเด็กกลุ่มเสี่ยง (โรคหืด/ภูมิแพ้) ให้เตรียมยาฉุกเฉิน และเฝ้าระวังอาการต่อเนื่อง 7 วันหลังสัมผัสฝุ่น
> 25 - 37.5	**เตือนภัย (Warning)**	งดกิจกรรมกลางแจ้ง สำหรับเด็กอนุบาลและประถมต้น พิจารณาให้เด็กกลุ่มเสี่ยงเรียนในห้องปิด (Safe Room) เนื่องจากเป็นจุดเริ่มเปลี่ยนของความเสี่ยง
> 37.5	**อันตราย (Danger)**	งดการเรียนการสอนชั่วคราว หรือปรับเป็นระบบออนไลน์ เพื่อลดโอกาสการกำเริบของโรคเฉียบพลันในวงกว้าง

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Health Risk Assessment) ของการเกิดโรคหืดกำเริบในเด็กกลุ่มเปราะบางในพื้นที่ภาคใต้ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองมอนเตคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ภายใต้สถานการณ์หมอกควันข้ามพรมแดนและความชื้นสัมพัทธ์สูง จากผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย (Summary of Findings)

จากการจำลองสถานการณ์จำนวน 10,000 รอบ พบว่าความเสี่ยงของการเกิดโรคหืดกำเริบในเด็กอายุ 6-11 ปี มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) กับระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 โดยจุดเปลี่ยนสำคัญของความเสี่ยง (Risk Inflection Point) เริ่มปรากฏที่ระดับความเข้มข้น 25 $\mu g/m^3$ ซึ่งเป็นจุดที่ความไม่แน่นอนของความเสี่ยง (Risk Uncertainty) เริ่มขยายตัวกว้างขึ้นกว่าระดับปกติ และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึงระดับ 50 $\mu g/m^3$ (เกณฑ์มาตรฐานทั่วไป) ค่าความน่าจะเป็นของความเสี่ยงเฉลี่ยได้เพิ่มสูงขึ้นถึง 0.082 (เพิ่มขึ้นร้อยละ 64 จากค่าฐาน) โดยมีความเสี่ยงสูงสุดที่เป็นไปได้ (Upper 95% CI) ถึง 0.102

ผลการศึกษานี้นำไปสู่การเสนอ "เกณฑ์เตือนภัยแบบพลวัต" (Dynamic Warning Thresholds) สำหรับโรงเรียนในพื้นที่ภาคใต้ โดยกำหนดให้เริ่มมาตรการ "เฝ้าระวัง" ที่ระดับ >15 $\mu g/m^3$ และยกระดับเป็น "เตือนภัย" (งดกิจกรรมกลางแจ้ง) ที่ระดับ >25 $\mu g/m^3$ เพื่อให้ทันต่อสถานการณ์ความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

5.2 อภิปรายผล (Discussion)

ผลการวิจัยที่ได้มีความสอดคล้องและขยายความองค์ความรู้เดิมในประเด็นสำคัญ ดังนี้

ความเสี่ยงที่ซ่อนเร้นก่อนถึงเกณฑ์มาตรฐาน การค้นพบว่าความเสี่ยงเริ่มมีความผันผวนและสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 25 $\mu g/m^3$ สอดคล้องกับข้อค้นพบของ Varopichetsan et al.[6] ที่ระบุว่าเด็กอายุ 6-11 ปี เป็นกลุ่มที่มีความไวต่อการกระตุ้น (Susceptibility) สูงกว่าผู้ใหญ่ และเริ่มพบผลกระทบทางสุขภาพที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (Low-level concentration) เพียง 15-25 $\mu g/m^3$ การใช้แบบจำลองมอนเตคาร์โลในการศึกษานี้ช่วยยืนยันเชิงปริมาณว่า การใช้เกณฑ์มาตรฐานเดียวที่ 37.5 หรือ 50 $\mu g/m^3$ อาจไม่เพียงพอในการคุ้มครองกลุ่มเปราะบางกลุ่มนี้ เนื่องจากการกระจายตัวของความเสี่ยง (Risk Distribution) เริ่มเบ้ไปทางสูงก่อนที่จะถึงค่ามาตรฐานดังกล่าว

อิทธิพลร่วมของความชื้นสัมพัทธ์ ผลการจำลองที่แสดงส่วนหางของความเสี่ยง (Tail Risk) ที่ยาวขึ้นในสภาวะที่มีความชื้นสูง สนับสนุนผลการศึกษาทางระบาดวิทยาที่พบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อการกำเริบของโรคหืด โดยเฉพาะในภาคใต้ที่มีลักษณะอากาศร้อนชื้น ซึ่งความชื้นสูงอาจส่งผลให้ละอองฝุ่นมีการรวมตัว (Agglomeration) หรือเพิ่มการแพร่กระจายของเชื้อราและสารก่อภูมิแพ้ในอากาศ ทำให้ความรุนแรงของผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติแม้ในระดับความเข้มข้นฝุ่นที่เท่ากัน

ความจำเป็นของมาตรการจำเพาะพื้นที่ ข้อเสนอให้ปรับเกณฑ์เตือนภัยโรงเรียนที่ระดับ 25 $\mu g/m^3$ สอดคล้องกับแนวทางขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่แนะนำค่าเป้าหมายระยะสั้น (Interim Target) ที่

เข้มงวดขึ้น และสอดคล้องกับบริบทของพื้นที่ภาคใต้ที่เป็นพื้นที่ด่านหน้าในการรับหมอกควันข้ามพรมแดน ซึ่งมักเกิดขึ้นรวดเร็วและรุนแรง การมีระบบเตือนภัยที่ไวกว่า (More Sensitive) จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดภาระทางสุขภาพและค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลที่อาจเกิดขึ้นตามมา

6. ข้อจำกัดของการวิจัย (Limitations)

การศึกษานี้เป็นการจำลองสถานการณ์โดยอาศัยข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ค่าพารามิเตอร์ความเสี่ยง (Odds Ratio) ที่นำมาใช้เป็นการสุ่มจากช่วงความเชื่อมั่นของการศึกษาเดิม ซึ่งแม้ว่าจะครอบคลุมความไม่แน่นอนทางสถิติ แต่ยังคงขึ้นอยู่กับบริบทของข้อมูลต้นทาง นอกจากนี้ การจำลองไม่ได้พิจารณาปัจจัยร่วมอื่น ๆ เช่น การติดเชื้อไวรัสทางเดินหายใจ หรือมลพิษก๊าซอื่น ๆ เช่น Ozone หรือ NO_2 ซึ่งอาจมีผลต่อการกำเริบของโรค

7. ข้อเสนอแนะ (Recommendations)

1. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย: หน่วยงานสาธารณสุขและสถานศึกษาในพื้นที่ภาคใต้ ควรพิจารณานำ "เกณฑ์ความเสี่ยงที่ระดับ 25 $\mu g/m^3$ ไปใช้เป็นจุดตัดในการตัดสินใจงดกิจกรรมกลางแจ้งสำหรับเด็กเล็กและเด็กประถมต้น แทนการรอเกณฑ์มาตรฐานระดับชาติ เพื่อป้องกันผลกระทบเฉียบพลัน
2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต: ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเก็บข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงลึกระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหมอกควันข้ามพรมแดนกับอาการหืดกำเริบ และควรขยายแบบจำลองให้ครอบคลุมผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์สาธารณสุข (Health Economic Impact) เพื่อให้เห็นความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบห้องเรียนปลอดฝุ่น (Safe Room) อย่างเป็นรูปธรรม

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และคณะผู้วิจัยนำโดย Varopichetsan et al. ที่ได้เผยแพร่ข้อมูลสถิติและผลการศึกษาเชิงระบาดวิทยาจากโครงการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็กต่อการกำเริบของโรคหืดในภาคใต้ของประเทศไทยสู่สาธารณะ ซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิอันทรงคุณค่าและเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาแบบจำลองมอนเตคาร์โลในการศึกษานี้

9. เอกสารอ้างอิง

(1) World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution [Internet]. 2022 [cited 2025 Oct 1]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health
(2) Institute for Health Metrics and Evaluation. State of Global Air 2024 [Internet]. 2024 [cited 2025 Oct 1]. Available from: https://www.healthdata.org/research-analysis/library/state-global-air-2024

(3) Pollution Control Department. Air Quality Assessments for Health and Environment Policies in Thailand [Internet]. 2018 [cited 2025 Oct 1]. Available from: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2021/10/pcdnew-2021-10-28_04-12-33_133858.pdf

(4) Pentamwa P, Oanh NT. Air quality in Southern Thailand during haze episode in relation to air mass trajectory. Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2008 Jul 1; 30 (4).

(5) Global Initiative for Asthma. 2024 Global Strategy for Asthma Management and Prevention [Internet]. 2024 [cited 2025 Oct 5]. Available from: https://ginasthma.org/2024-report/

(6) Varopichetsan S, Bunplod N, Dejchanchaiwong R, Tekasakul P, Ingviya T. Short-term exposure to fine particulate matter and asthma exacerbation: a large population-based case-crossover study in Southern Thailand. Environmental Health. 2025 May 7; 24 (1): 28.

(7) Metropolis N, Ulam S. The Monte Carlo method. J Am Stat Assoc. 1949;44(247):335-41.

(8) Bateson TF, Schwartz J. Children's response to air pollutants. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. 2008 Feb 1;71(3): 238 – 43.

(9) Schwartz J. Is there harvesting in the association of airborne particles with daily deaths and hospital admissions?. Epidemiology. 2001 Jan 1; 12 (1): 55 – 61.

(10) Zuo B, Liu C, Chen R, Kan H, Sun J, Zhao J, Wang C, Sun Q, Bai H. Associations between short-term exposure to fine particulate matter and acute exacerbation of asthma in Yancheng, China. Chemosphere. 2019 Dec 1; 237: 124497.

(11) Ding J, Han S, Wang X, Yao Q. Impact of air pollution changes and meteorology on asthma outpatient visits in a megacity in North China Plain. Heliyon. 2023; 9 (11) :e21803.

(12) Kasirawat P, Dejchanchaiwong R, Ingviya T. Effects of Transboundary Haze on Hospital Outpatient Visits due to Respiratory and Cardiovascular Diseases in Regional Health 12. RTA Med J. 2022;49(3):594-614.

(13) Firestone M, Fenner-Crisp P, Barry T, Bennett D, Chang S, Callahan M, Burke A, Michaud J, Olsen M, Cirone P, Barnes D. Guiding principles for Monte Carlo analysis. Washington, DC: US Environmental Protection Agency. 1997 Mar;35. [cited 2025 Oct 5]. Available from: https://www.epa.gov/risk/guiding-principles-monte-carlo-analysis

(14) Ott WR. A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations. Journal of the Air & Waste Management Association. 1990 Oct 1; 40 (10): 1378 – 83.

(15) Burmaster DE, Anderson PD. Principles of good practice for the use of Monte Carlo techniques in human health and ecological risk assessments. Risk analysis. 1994 Aug; 14 (4): 477 – 81.

(16) Zhang J, Yu KF. What's the relative risk?: A method of correcting the odds ratio in cohort studies of common outcomes. Jama. 1998 Nov 18; 280(19): 1690 – 1.