สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
Food and Drug Administration

วารสารอาหารและยา THAI FOOD AND DRUG JOURNAL
ปีที่ 33 ฉบับที่ 3 (2569): กันยายน – ธันวาคม Vol. 33 No. 3 (2026): September – December
https://he01.tci-thaijo.org/index.php/fdajournal/index

การประเมินการได้รับสัมผัสสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (เบนโซเอไพรีน) จากการบริโภคหมูปิ้งของประชากรในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

รัญชิดา สังคหะพงศ์[1] ศศินา วงษ์อารี[2] ศรัณยา กิจดำรงธรรม[3] ปรัญรัชต์ ธนวิยุทธ์ภัคดี[3]

[1]หลักสูตรพิษวิทยาและโภชนาการเพื่ออาหารปลอดภัย สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล
[2]หน่วยวิจัยและบริการทดสอบทางคลินิกสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล
[3] หน่วยพิษวิทยาทางอาหาร สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล
ที่อยู่ติดต่อ: ปรัญรัชต์ ธนวิยุทธ์ภักดี สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล 999 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170 pharrunrat.tan@mahidol.ac.th

Risk Assessment in Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (Benzo[a] pyrene) from Consumption of Grilled Pork Skewers in the Thai Population Living in Bangkok and Its Surrounding Provinces

Runshida Sungkahapong[1], Sasina Wongs-Aree[2], Sarunya Kitdumrongthum[3], Pharrunrat Tanaviyutpakdee[3]

[1]Toxicology and Nutrition for Food Safety Program, Institute of Nutrition, Mahidol University, Nakhon Pathom
[2]Clinical Trial Research and Service Unit for Food Products, Institute of Nutrition, Mahidol University, Nakhon Pathom
[3]Food Toxicology Unit, Institute of Nutrition, Mahidol University, Nakhon Pathom
Contact address: Pharrunrat Tanaviyutpakdee, Institute of Nutrition, Mahidol University 999 Phutthamonthon 4 Road, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand, Thailand, pharrunrat.tan@mahidol.ac.th

Received: 9 April 2026, **Revised:** 2 July 2026, **Accepted:** 5 August 2026

Abstract

Background: Benzo[a]pyrene (B[a]P), a potent carcinogenic and mutagenic polycyclic aromatic hydrocarbon (PHP), is generated through the incomplete combustion of organic matter during high-temperature meat grilling. Although “Moo Ping" (grilled pork skewers) represents a ubiquitous street food in Thailand, comprehensive quantitative data exploring dietary exposure risks within urban settings remain critically scarce. Despite the widespread consumption of grilled pork skewers, data on the cancer risk associated with B[a]P exposure among residents of the Bangkok Metropolitan Area remain limited, highlighting the need for a comprehensive risk assessment.

Objectives: To analyze the level of benzo[a]pyrene and assess the cancer risk from exposure through the consumption of grilled pork skewers among Thai residents of Bangkok and its surrounding provinces.

Methods: This research was a cross-sectional study from January to February, 2026. Utilizing a multistage cluster sampling design, 22 pooled grilled pork samples were collected across 20 randomized districts in Bangkok and two adjacent provinces (Nonthaburi and Samut Prakan). B[a]P concentrations were quantified using high-resolution Gas Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (GC-MS/MS). Dietary exposure was modeled across four discrete intake scenarios (Mean and 97.5th percentile) incorporating national food consumption data derived from the National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards: ACFS, Thailand.

Results: The study suggested that the mean concentration of B[a]P in the samples was 2.05×10^{-5} mg/kg. demonstrating absolute compliance with the maximum permissible limits established by the European Union and China. Demographic analysis revealed that males exhibited a higher mean daily consumption rate than females (6.12 g/day versus 5.21 g/day). 1.60×10^{-7} mg/kg body weight/day, primarily due to lower average body mass. Nevertheless, the calculated Margin of Exposure (MOE) across all demographic cohorts and consumption scenarios ranged from 4.36×10^{5} to 1.17×10^{8}. These values substantially exceeded the recognized toxicological safety threshold (>10,000).

Conclusions: The dietary intake of grilled pork skewers within the Bangkok Metropolitan Area poses a negligible carcinogenic risk, remaining well within international safety limits. Nonetheless, young children represent a highly vulnerable cohort; hence, implementing continuous monitoring of commercial grilling practices and fostering public dietary awareness are recommended to mitigate potential long-term cumulative exposure.

Keywords: Benzo[a]pyrene, polycyclic aromatic hydrocarbon, risk assessment, cancer, grilled pork skewers

บทคัดย่อ

ความสำคัญ: สารเบนโซเอไพรีน (Benzo[a]pyrene: B[a]P) จัดเป็นสารในกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon: PAHs) ที่มีฤทธิ์ก่อมะเร็งและการกลายพันธุ์สูงในมนุษย์ ซึ่งมักปนเปื้อนในอาหารผ่านกระบวนการย่าง แม้ว่าหมูปิ้งจะเป็นอาหารที่มีการบริโภคอย่างแพร่หลายในประเทศไทย แต่ข้อมูลการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณจากการได้รับสัมผัสสารชนิดนี้ในประชากรเขตเมืองยังมีข้อจำกัด จึงจำเป็นต้องมีการประเมินความเสี่ยงอย่างครอบคลุม

วัตถุประสงค์: เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารเบนโซเอไพรีนและประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งจากการได้รับสัมผัสสารดังกล่าวผ่านการบริโภคหมูปิ้งของประชากรไทยที่อาศัยในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

วิธีการวิจัย: การศึกษานี้เป็นแบบตัดขวาง (cross-sectional study) ในช่วงเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 สุ่มเก็บตัวอย่างหมูปิ้งด้วยวิธีหลายขั้นตอน (multistage sampling) รวมทั้งสิ้น 22 ตัวอย่าง จากตลาด 20 เขตในกรุงเทพมหานคร และ 2 จังหวัดปริมณฑล (นนทบุรี และสมุทรปราการ) วิเคราะห์ปริมาณเบนโซเอไพรีนด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Tandem Mass Spectrometry: GC-MS/MS ที่มีความจำเพาะสูง และประเมินการได้รับสัมผัสทางอาหาร (dietary exposure) คำนวณร่วมกับการบริโภคอาหารระดับชาติจากสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) ภายใต้แบบจำลอง 4 รูปแบบ (เฉลี่ย และเปอร์เซ็นไทล์ ที่ 97.5)

ผลการศึกษา: ผลการศึกษาพบความเข้มข้นเฉลี่ยของเบนโซเอไพรีนในหมูปิ้งเท่ากับ 2.05 x 10^{-5} mg/kg ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยตามกฎหมายของสหภาพยุโรป (EU) และสาธารณรัฐประชาชนจีน ในส่วนของพฤติกรรมการบริโภคพบว่า เพศชายมีแนวโน้มการบริโภคหมูปิ้งในปริมาณที่สูงกว่าเพศหญิง (6.12 g/วัน เทียบกับ 5.21 g/วัน) เมื่อประเมินความเสี่ยงในสถานการณ์กรณีเลวร้ายที่สุด (worst-case scenario) พบว่า กลุ่มเด็กอายุ 3–5.9 ปี มีระดับการได้รับสัมผัสสารสูงสุดที่ 1.60 x 10^{-7} mg/kg น้ำหนักตัว/วัน เนื่องจากน้ำหนักตัวที่น้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัย (Margin of Exposure: MOE) ของทุกกลุ่มประชากรในทุกสถานการณ์จำลอง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 4.36 x 10^{5} ถึง 1.17 x 10^{8} ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์เฝ้าระวังอันตราย (>10,000) อย่างมีนัยสำคัญ

สรุปผล: การศึกษาครั้งนี้บ่งชี้ว่า การบริโภคหมูปิ้งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งในระดับที่ต่ำมากและมีความปลอดภัยสูง แต่กลุ่มเด็กเล็กจัดเป็นกลุ่มเปราะบางทางพิษวิทยาที่ควรได้รับการเฝ้าระวังและส่งเสริมพฤติกรรมการบริโภคที่เหมาะสมเพื่อลดความเสี่ยงสะสม

คำสำคัญ: เบนโซเอไพรีน โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน การประเมินความเสี่ยง มะเร็ง หมูปิ้ง

บทนำ

เบนโซเอไพรีน (Benzo[a]pyrene: B[a]P) เป็นหนึ่งในสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs) ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่ตกค้างยาวนาน และเป็นที่ทราบกันดีว่ามีศักยภาพในการก่อโรคมะเร็งและก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ สถาบันวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ (International Agency for Research on Cancer: IARC) ได้จำแนกเบนโซเอไพรีนให้เป็นสารก่อมะเร็งกลุ่มที่ 1 ซึ่งมีหลักฐานยืนยันแน่ชัดว่าก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์[1] แหล่งกำเนิดหลักของการปนเปื้อนเบนโซเอไพรีนมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ทั้งจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง กิจกรรมในครัวเรือน และแนวทางการปฏิบัติทางการเกษตร เบนโซเอไพรีนเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ผ่านการรับประทาน การสูดดม และการสัมผัสทางผิวหนัง ช่องทางที่ประชากรส่วนใหญ่ได้รับสัมผัสสารชนิดนี้มากที่สุด คือการบริโภคอาหารที่ปนเปื้อน[2] ซึ่งเกิดขึ้นผ่านกระบวนการประกอบอาหาร เช่น การย่าง การทอด การอบ และการรมควัน นอกจากนี้ ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการปรุงอาหารยังมีผลต่อการสะสมของเบนโซเอไพรีนอีกด้วย ทั้งนี้เบนโซเอไพรีนถูกนำมาใช้เป็นดัชนีชี้วัด (marker) สำหรับการปนเปื้อนของสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากมีคุณสมบัติในการก่อมะเร็งที่ชัดเจน[3] ทั้งนี้ มาตรฐานของสหภาพยุโรป (Commission regulation (EU) 2023/915) มีการระบุค่าปริมาณสูงสุดที่ยอมรับได้ของเบนโซเอไพรีนในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์รมควันไว้ที่ไม่เกิน 2 µg/kg[4] นอกจากนี้ มาตรฐานความปลอดภัยอาหารระดับชาติของสาธารณรัฐประชาชนจีน (National Food Safety Standard) ยังได้กำหนดเกณฑ์ปริมาณสูงสุดของเบนโซเอไพรีนสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์รมควัน (Smoked meats) ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ (Meat products) และเนื้อสัตว์ประเภทปิ้ง ย่าง หรืออบ (Barbecued, baked or grilled meat) ไว้ที่ไม่เกิน 5.0 µg/kg[5] อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีการประกาศกำหนดเกณฑ์มาตรฐานปริมาณสูงสุดของสารเบนโซเอไพรีนในผลิตภัณฑ์อาหารภายใต้ประกาศกระทรวงสาธารณสุข

"หมูปิ้ง" เป็นอาหารยอดนิยมอย่างมากในประเทศไทยและเป็นองค์ประกอบสำคัญของอาหารริมทาง (street food) สำหรับผู้อยู่อาศัยในเขตเมือง โดยสามารถพบร้านจำหน่ายหมูปิ้งได้ทั่วไป ดังนั้น ประชากรไทยจึงมีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งจากการบริโภคหมูปิ้ง เนื่องจากโดยปกติแล้วหมูปิ้งมักปรุงด้วยการปิ้งบนเตาถ่าน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน[6] ยิ่งไปกว่านั้น การใช้ความร้อนสูงในการปิ้งย่าง การที่เนื้อหมูสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง รวมถึงการนำมาปิ้งซ้ำ ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมให้เกิดการก่อตัวและการสะสมของโพลีไซคลิกอะโรมาติก

ไฮโดรคาร์บอน ในปริมาณที่สูงขึ้น[3] นอกจากนี้ ปริมาณโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในเนื้อหมูยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณไขมันที่สูง เนื่องจากโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมัน (lipophilic) จึงมักสะสมและตกค้างอยู่ในชั้นไขมันของเนื้อหมู[7]

การศึกษานี้ ดำเนินการเพื่อประเมินความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในอาหาร โดยศึกษาเฉพาะสารเบนโซเอไพรีนจากการบริโภคหมูปิ้ง โดยทำการเก็บตัวอย่างจากร้านค้าในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อให้สะท้อนถึงรูปแบบการบริโภคจริงในชีวิตประจำวันของประชากร และใช้ข้อมูลการบริโภคอาหารจากสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.)[8] ในการประเมินความเสี่ยงดังกล่าว

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารเบนโซเอไพรีนที่ปนเปื้อนในหมูปิ้งจากตลาดต่างๆ ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

2. เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งจากการได้รับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีนผ่านการบริโภคหมูปิ้งของประชากรไทยที่อาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจแบบภาคตัดขวาง (cross-sectional survey) เพื่อประเมินความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีนจากการบริโภคหมูปิ้งของประชากรในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ดำเนินการศึกษาระหว่างเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 โดยใช้กระบวนการประเมินความเสี่ยง 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย

ขั้นตอนที่ 1 การระบุอันตราย (hazard identification) เป็นการสืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับสารเบนโซเอไพรีน

ขั้นตอนที่ 2 การระบุลักษณะของอันตราย (hazard characterization) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลด้านพิษวิทยา เพื่อกำหนดค่าความปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค ซึ่งกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ โดยคณะกรรมาธิการด้านสารปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร (Scientific Panel on Contaminants in the Food Chain: CONTAM Panel) แห่งหน่วยงานความปลอดภัยด้านอาหารแห่งสหภาพยุโรป (European Food Safety Authority: EFSA) ได้กำหนดค่าขีดจำกัดล่างของค่าโดสอ้างอิงที่ระดับการตอบสนองร้อยละ 10 (Benchmark Dose Lower Confidence Limit 10% response: $BMDL_{10}$) ของเบนโซเอไพรีนไว้ที่ 0.07 mg/kg น้ำหนักตัวต่อวัน เพื่อใช้เป็นค่าจุดอ้างอิงในการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินการได้รับสัมผัส (exposure assessment) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่การเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการบริโภค และการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารเบนโซเอไพรีนในตัวอย่างอาหาร เพื่อใช้ในการคำนวณการได้รับสัมผัส

ขั้นตอนที่ 4 การอธิบายลักษณะความเสี่ยง เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 โดยคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัย (Margin of Exposure: MOE)

กลุ่มตัวอย่าง

สุ่มเก็บตัวอย่างหมูปิ้งแบบหลายขั้นตอน (multistage cluster sampling design) โดยสุ่มเลือกหน่วยพื้นที่ในขั้นแรก สุ่มเลือกร้านจำหน่ายในขั้นที่สอง และสุ่มเลือกหน่วยตัวอย่างหมูปิ้งในขั้นสุดท้าย โดยในกรุงเทพมหานคร สุ่มจำนวน 20 เขต จากทั้งหมด 50 เขต ให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ใน 6 โซน ได้แก่ กรุงเทพกลาง กรุงเทพเหนือ กรุงเทพใต้ กรุงเทพตะวันออก กรุงธนเหนือ และกรุงธนใต้ และสุ่มจากจังหวัดในปริมณฑล 2 จังหวัด จากทั้งหมด 5 จังหวัด คือ สมุทรปราการ และนนทบุรี โดยเลือกพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นที่สุด พื้นที่ที่ได้รับการคัดเลือกคิดเป็นร้อยละ 40 ของจำนวนเขตและจังหวัดทั้งหมดในกรอบการศึกษา จากนั้นการเก็บตัวอย่างหมูปิ้งจาก 3 ร้านที่ใช้เตาถ่านในการปิ้ง และตั้งอยู่บริเวณริมถนนหรือตลาดในพื้นที่ชุมชน และแต่ละร้านเก็บตัวอย่างหมูปิ้งจำนวน 3 ไม้ รวมทั้งสิ้น 22 ตัวอย่าง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสาร (Balance) ของบริษัท Eppendorf, Germany

2. เครื่องบด (Blender) ของ E life กำลังไฟ 200W

3. เครื่องปั่นผสม (Homogenizer) ของบริษัท Eppendorf, Germany

4. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ของบริษัท Eppendorf, Germany

5. เครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) รุ่น Vortex-Genie 2 ของบริษัท Scientific Industries, USA

6. เครื่องระเหยสารแบบไนโตรเจน (Nitrogen evaporator) ของบริษัท Organomation, USA

7. เครื่องดูดควัน (Chemical fume hood) ของบริษัท Thermo Scientific, USA

8. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรมิตรี (GC-MS/MS) Thermo Scientific, USA

9. ไมโครปิเปต (Micropipette)

10. ทิปปิเปต (Pipette Tips)

11. หลอดเซนติฟิวจ์ (Centrifuge Tube)

12. ขวดสำหรับฉีดสาร (GC Vial)

สารเคมีและสารที่ใช้ทดสอบ

1. สารสกัดสำเร็จรูป QuEChERS mix II ของบริษัท Macherey-Nagel, Germany

2. สารชุด QuEChERS clean-up ของบริษัท Macherey-Nagel, Germany

3. อะซีโตไนไตรล์ (Acetonitrile) ของบริษัท Sigma-Aldrich

4. น้ำกลั่น (Distilled water)

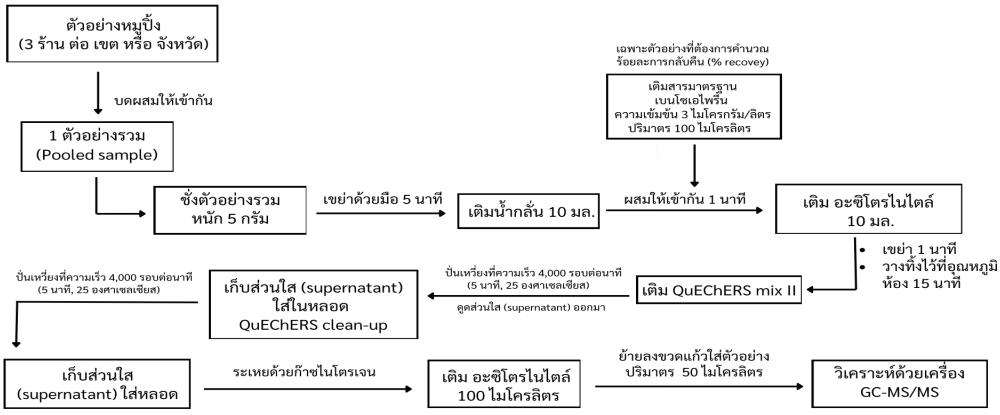
5. สารมาตรฐานเบนโซเอไพรีน (Benzo[a] pyrene Standard) ของบริษัท Sigma-Aldrich

ขั้นตอนการศึกษา

1. การเตรียมตัวอย่างโดยดัดแปลงจากวิธีของ Thamsorn และคณะ[9] โดยนำหมูปิ้ง 3 ไม้ จาก 3 ร้านค้าในแต่ละพื้นที่มาบดรวมกัน (Pooled sample) จากนั้นชั่งตัวอย่าง 5 g ปั่นผสมกับน้ำกลั่น 10 ml และสกัดด้วยอะซีโตไนไตรล์ (Acetonitrile) ก่อนเติมสารสกัด QuEChERS mix II (ประกอบด้วย $MgSO_4$ และ CH_3COONa) เขย่าตัวอย่างด้วยมือและนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อเก็บส่วนใส จากนั้นกำจัดสารอื่นๆ ด้วย QuEChERS clean-up จากนั้นนำส่วนใสที่ได้มาเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วละลายด้วยอะซีโตไนไตรล์ 100 µl

2. การวิเคราะห์ปริมาณเบนโซเอไพรีนในตัวอย่าง ดัดแปลงตามวิธีของ Thamsorn และคณะ[9] โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS/MS) ร่วมกับคอลัมน์ชนิด DB-5 MS (30 m × 0.32 mm i.d., 0.25 µm film thickness) กำหนดสภาวะการฉีดตัวอย่างปริมาณ 1 µl ในรูปแบบ splitless ที่อุณหภูมิ 300°C

3. การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (method validation) ตามหลักเกณฑ์ของ AOAC[10] โดยประเมินความเป็นเส้นตรง (linearity) จากกราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้น 0.625–20 ppb ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีสารมาตรฐาน (standard) คำนวณค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) และร้อยละความต่างสัมพัทธ์ (%RPD) ตามเกณฑ์การยอมรับที่น้อยกว่าร้อยละ 21–30 และ 32–45 ตามลำดับ ในส่วนของความถูกต้อง (accuracy) ประเมินจากร้อยละการได้กลับคืน (%Recovery) โดยวิธีเติมสารมาตรฐาน (spiking) ที่ความเข้มข้น 3 ppb ลงในตัวอย่างตามเกณฑ์การยอมรับในช่วงร้อยละ 40–120 นอกจากนี้ยังกำหนดขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดของการหาเชิงปริมาณ (LOQ) จากพารามิเตอร์ของกราฟมาตรฐาน โดยอ้างอิงค่าจากงานวิจัยที่ผ่านมา[11] ซึ่งระบุที่ 0.029 mg/ml และ 0.107 mg/ml ตามลำดับ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหมูปิ้งเพื่อเตรียมวิเคราะห์ปริมาณเบนโซเอไพรีนด้วยเครื่อง GC-MS/MS

4. การประเมินปริมาณการได้รับสัมผัสเบนโซเอไพรีน (exposure assessment) ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารจากการวิเคราะห์ด้วย GC-MS/MS ร่วมกับข้อมูลปริมาณการบริโภคทั้งต่อประชากรทั้งหมด (per capita) และเฉพาะผู้บริโภค (eater only) และน้ำหนักตัวเฉลี่ยของประชากร ใช้ข้อมูลของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) โดยคำนวณการได้รับสัมผัสดังสมการ

$$\text{ปริมาณการได้รับสัมผัส B[a]P (mg/kg น้ำหนักตัว/วัน)} = \frac{\text{ความเข้มข้น B[a]P (mg/kg)} \times \text{ปริมาณบริโภค (mg/คน/วัน)}}{\text{น้ำหนักตัวเฉลี่ยของประชากร (kg)}}$$

การประเมินการได้รับสัมผัสเบนโซเอไพรีน มีการจำลองเป็น 4 สถานการณ์ (scenario)

4.1 คำนวณจากค่าเฉลี่ยของปริมาณการบริโภคอาหาร ร่วมกับค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของเบนโซเอไพรีน แทนพฤติกรรมการบริโภคปกติ และอาหารมีสารปนเปื้อนในระดับเฉลี่ย

4.2 คำนวณจากค่าเฉลี่ยของปริมาณการบริโภคอาหาร ร่วมกับค่าความเข้มข้นของเบนโซเอไพรีน ณ เปอร์เซ็นไทล์ที่ 97.5 ดูผลกระทบ เมื่ออาหารมีความปนเปื้อนสูง

4.3 คำนวณจากปริมาณการบริโภคอาหาร ณ เปอร์เซ็นไทล์ที่ 97.5 ร่วมกับค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของเบนโซเอไพรีน แทนกลุ่มคนที่ชอบบริโภคอาหารชนิดนั้นเป็นประจำ และอาหารมีการปนเปื้อนในระดับค่าเฉลี่ยทั่วไป

4.4 คำนวณจากปริมาณการบริโภคอาหาร ณ เปอร์เซ็นไทล์ที่ 97.5 ร่วมกับค่าความเข้มข้นของเบนโซเอไพรีน ณ เปอร์เซ็นไทล์ที่ 97.5 สถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงสุด (worst-case) บริโภคในปริมาณมากและอาหารมีการปนเปื้อนสูง

5. ประเมินความเสี่ยงต่อการก่อมะเร็ง (risk characterization) คำนวณโดยหาค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัย (MOE) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าขีดจำกัดล่างของค่าโดสอ้างอิงที่ระดับการตอบสนองร้อยละ 10 ($BMDL_{10}$) ต่อปริมาณการได้รับสัมผัสสารดังสมการ

$$MOE = \frac{BMDL_{10} \text{ (mg/kg น้ำหนักตัว/วัน)}}{\text{ปริมาณการได้รับสัมผัส (mg/kg น้ำหนักตัว/วัน)}}$$

ตามแนวทางของ EFSA (Opinion of the Scientific Committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic)[11] ระบุว่าหากค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัย (MOE) ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่า 10,000 ถือว่าระดับการได้รับสัมผัสสารดังกล่าวมีความเสี่ยงที่น่ากังวลต่อสุขภาพของผู้บริโภค และควรเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิด

การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive Statistics) สำหรับการรายงานข้อมูลความเข้มข้นของเบนโซเอไพรีนในตัวอย่างหมูปิ้ง และน้ำหนักตัวของประชากร ในรูปค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 97.5 เพื่อใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มผู้บริโภคปริมาณมาก (high consumers) หรือกลุ่มที่ได้รับเบนโซเอไพรีนในระดับที่สูงกว่าปกติ รวมถึง ค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัย (MOE) จำแนกตามช่วงอายุและเพศ

ผลการศึกษา

1. ผลวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารเบนโซเอไพรีนในหมูปิ้ง

จากการสำรวจและเก็บตัวอย่างหมูปิ้งจากตลาดและร้านค้าริมทางในกรุงเทพมหานคร และจังหวัดปริมณฑล 22 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารเบนโซเอไพรีนในหมูปิ้ง พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในภาพรวมเท่ากับ 2.05×10^{-5} มก./กก. โดยตัวอย่างจากเขตคลองเตยตรวจพบค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 4.45×10^{-5} มก./กก. ในขณะที่เขตมีนบุรีตรวจพบค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 2.04×10^{-6} มก./กก. และเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของสหภาพยุโรป (Commission regulation (EU) 2023/915) และมาตรฐานความปลอดภัยอาหารระดับชาติของสาธารณรัฐประชาชนจีน (National Food Safety Standard) ซึ่งกำหนดปริมาณสารเบนโซเอไพรีน

สูงสุดในกลุ่มผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์รมควันและเนื้อสัตว์ย่างไว้ไม่เกิน 2.0 มคก./กก. หรือ 0.002 มก./กก.) และ 5.0 มคก./กก. หรือ 0.005 มก./กก.) พบว่ามีค่าความเข้มข้นไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานของต่างประเทศที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 1

การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณสารเบนโซเอไพรีนด้วยเครื่อง GC-MS/MS ให้ผลสอดคล้องตามเกณฑ์มาตรฐานของ AOAC[10] โดยมีความแม่นยำ (precision) พิจารณาจากค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ในช่วงร้อยละ 1.49–30.29 และค่าร้อยละความต่างสัมพัทธ์ (%RPD) เท่ากับร้อยละ 16.91 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นต่ำ ในส่วนของความถูกต้อง (accuracy) พบค่าร้อยละการได้กลับคืน (%Recovery) เท่ากับร้อยละ 53.09 เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับที่ระดับความเข้มข้น 1–10 ppb (ช่วงร้อยละ 40–120) จึงยืนยันได้ว่าวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความเหมาะสมและให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือสำหรับนำไปใช้ในการศึกษา

2. ผลวิเคราะห์ปริมาณการบริโภคหมูปิ้งของประชากรไทย ตามช่วงอายุและเพศ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิของ มกอช. ตั้งแต่อายุ 3 ปีขึ้นไป พบว่าปริมาณการบริโภคหมูปิ้งมีความแตกต่างกันตามช่วงอายุและเพศ โดยในกลุ่มประชากรทั้งหมด (per capita) กลุ่มอายุ 13–17.9 ปี มีปริมาณการบริโภคเฉลี่ยสูงสุดที่ 10.32 กรัม/วัน แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มผู้บริโภคจริง (eater only) พบว่า กลุ่มอายุ 18–34.9 ปี มีปริมาณการบริโภคสูงสุดที่ 47.07 g/วัน สำหรับปัจจัยด้านเพศ พบว่าเพศชายมีค่าเฉลี่ยการบริโภคสูงกว่าเพศหญิงในทุกดัชนีชี้วัด โดยเพศชายบริโภคเฉลี่ย 42.73 g/วัน ขณะที่เพศหญิงบริโภคเฉลี่ย 36.92 g/วัน นอกจากนี้ ในกลุ่มผู้บริโภคระดับสูง (P97.5) ของช่วงอายุ 18–34.9 ปี มีปริมาณการบริโภคสูงถึง 128 g/วัน ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

3. ผลการประเมินปริมาณการได้รับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีนจากการบริโภคหมูปิ้ง

ผลการประเมินปริมาณการได้รับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีน ตั้งแต่อายุ 3 ปีขึ้นไป พบว่ากลุ่มเด็กเล็กช่วงอายุ 3–5.9 ปี เป็นกลุ่มที่มีปริมาณการได้รับสัมผัสสารสูงที่สุดในทุกรูปแบบการบริโภค โดยเฉพาะในสถานการณ์ความเสี่ยงสูงสุดของกลุ่มผู้บริโภคจริง มีค่าสูงถึง 1.60×10^{-7} mg/kg ในขณะที่กลุ่มผู้สูงอายุมีแนวโน้มการได้รับสัมผัสต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านเพศในกลุ่มผู้บริโภคจริง พบว่า เพศหญิงมีค่าการได้รับสัมผัสสารสูงกว่าเพศชายเล็กน้อยในสถานการณ์ที่ 3 และ 4 แตกต่างจากภาพรวมประชากรทั้งหมด ที่เพศชาย

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารเบนโซเอไพรีนในหมูปิ้ง

เขต/จังหวัด	ปริมาณความเข้มข้นของเบนโซเอไพรีน (mg/kg)
กรุงเทพโซนกลาง	
1. ห้วยขวาง	$(3.47 \pm 1.39) \times 10^{-5}$
2. ดินแดง	$(9.07 \pm 7.50) \times 10^{-6}$
3. วังทองหลาง	$(2.44 \pm 0.33) \times 10^{-5}$
กรุงเทพโซนเหนือ	
4. บางเขน	$(3.08 \pm 0.40) \times 10^{-5}$
5. ดอนเมือง	$(1.27 \pm 1.06) \times 10^{-5}$
6. หลักสี่	$(7.11 \pm 2.15) \times 10^{-6}$
กรุงเทพโซนใต้	
7. ปทุมวัน	$(4.22 \pm 3.23) \times 10^{-5}$
8. ยานนาวา	$(2.61 \pm 0.21) \times 10^{-5}$
9. คลองเตย	$(4.45 \pm 0.18) \times 10^{-5}$
10. บางนา	$(8.82 \pm 0.94) \times 10^{-6}$
กรุงเทพโซนตะวันตก	
11. บึงกุ่ม	$(7.52 \pm 0.42) \times 10^{-6}$
12. คันนายาว	$(3.74 \pm 5.60) \times 10^{-6}$
13. มีนบุรี	$(2.04 \pm 2.65) \times 10^{-6}$
14. บางกะปิ	$(1.97 \pm 0.17) \times 10^{-5}$
ธนบุรีเหนือ	
15. ธนบุรี	$(2.13 \pm 0.20) \times 10^{-5}$
16. คลองสาน	$(2.46 \pm 0.10) \times 10^{-5}$
17. ตลิ่งชัน	$(1.67 \pm 0.49) \times 10^{-5}$
ธนบุรีใต้	
18. บางขุนเทียน	$(1.70 \pm 0.19) \times 10^{-5}$
19. ภาษีเจริญ	$(2.62 \pm 0.05) \times 10^{-5}$
20. บางแค	$(2.55 \pm 0.11) \times 10^{-5}$
จังหวัดในปริมณฑล	
21. สมุทรปราการ	$(2.64 \pm 0.23) \times 10^{-5}$
22. นนทบุรี	$(1.95 \pm 0.029) \times 10^{-5}$
ปริมาณความเข้มข้น	
- B[a]P เฉลี่ย	$(2.05 \pm 1.16) \times 10^{-5}$
- B[a]P ที่ 97.5 เปอร์เซ็นไทล์	4.33×10^{-5}

มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าในทุกสถานการณ์ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการได้รับสัมผัสสารในกลุ่มผู้บริโภคจริงมีค่าสูงกว่ากลุ่มประชากรทั้งหมดอย่างชัดเจนในทุกกรณี ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการบริโภคและบ่งชี้ว่าความแตกต่างของช่วงวัยส่งผลต่อระดับการได้รับสัมผัสสารอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าปัจจัยด้านเพศ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปริมาณการบริโภคหมูปิ้งของประชากรไทย จำแนกตามช่วงอายุและเพศ

ปริมาณการบริโภคหมูปิ้ง (สุก) (g/คน/วัน)	ตามช่วงอายุ (ปี)/น้ำหนักตัวเฉลี่ย (kg)						เพศ/น้ำหนักตัวเฉลี่ย (kg)	
	3-5.9/ 17.25	6-12.9/ 33.38	13-17.9/ 53.42	18-34.9/ 63.12	35-64.9/ 63.53	≥ 65/ 55.77	ชาย/ 59.35	หญิง/ 56.03
ประชากรทั้งหมด (Per capita)								
ค่าเฉลี่ย	7.21	8.68	10.32	8.29	3.48	1.63	6.12	5.21
ค่าเปอร์เซ็นไทล์ ที่ 97.5	32.00	41.15	45.72	36.57	27.43	13.71	36.57	32.00
เฉพาะผู้ที่บริโภคจริง (Eater only)								
ค่าเฉลี่ย	32.40	39.31	45.69	47.07	35.26	26.86	42.73	36.92
ค่าเปอร์เซ็นไทล์ ที่ 97.5	64.00	64.00	96.00	128.00	64.00	64.00	64.00	64.00

ตารางที่ 3 ปริมาณการได้รับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีนจากการบริโภคหมูปิ้งภายใต้ 4 สถานการณ์จำลอง

คุณลักษณะประชากร	ต่อประชากรทั้งหมด (mg/kg น้ำหนักตัว/วัน)				เฉพาะผู้ที่บริโภคจริง (mg/kg น้ำหนักตัว/วัน)			
	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2	สถานการณ์ที่ 3	สถานการณ์ที่ 4	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2	สถานการณ์ที่ 3	สถานการณ์ที่ 4
อายุ								
3 - 5.9 ปี	8.57×10^{-9}	1.81×10^{-8}	3.80×10^{-8}	8.03×10^{-8}	3.85×10^{-8}	8.13×10^{-8}	7.60×10^{-8}	1.60×10^{-7}
6 - 12.9 ปี	5.33×10^{-9}	1.13×10^{-8}	2.53×10^{-8}	5.34×10^{-8}	2.41×10^{-8}	5.10×10^{-8}	3.93×10^{-8}	8.30×10^{-8}
13 - 17.9 ปี	3.96×10^{-9}	8.36×10^{-9}	1.75×10^{-8}	3.71×10^{-8}	1.75×10^{-8}	3.70×10^{-8}	3.68×10^{-8}	7.78×10^{-8}
18 - 34.9 ปี	2.69×10^{-9}	5.69×10^{-9}	1.19×10^{-8}	2.51×10^{-8}	1.53×10^{-8}	3.23×10^{-8}	4.16×10^{-8}	8.78×10^{-8}
35 - 64.9 ปี	1.12×10^{-9}	2.37×10^{-9}	8.85×10^{-9}	1.87×10^{-8}	1.14×10^{-8}	2.40×10^{-8}	2.06×10^{-8}	4.36×10^{-8}
65 ปีขึ้นไป	5.99×10^{-10}	1.27×10^{-9}	5.04×10^{-9}	1.06×10^{-8}	9.87×10^{-9}	2.09×10^{-8}	2.35×10^{-8}	4.97×10^{-8}
เพศ								
ชาย	2.11×10^{-9}	4.46×10^{-9}	1.26×10^{-8}	2.67×10^{-8}	1.48×10^{-8}	3.12×10^{-8}	2.21×10^{-8}	4.67×10^{-8}
หญิง	1.91×10^{-9}	4.03×10^{-9}	1.17×10^{-8}	2.47×10^{-8}	1.35×10^{-8}	2.85×10^{-8}	2.34×10^{-8}	4.95×10^{-8}

4. ผลการประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งของเบนโซเอไพรีนจากการบริโภคหมูปิ้ง

จากการคำนวณค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัย (MOE) เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการก่อมะเร็งจากการบริโภคหมูปิ้งในกลุ่มประชากรจำแนกตามช่วงอายุและเพศ ตาม**ตารางที่ 4** พบว่าค่า MOE ในทุกช่วงอายุและทุกสถานการณ์จำลอง มีค่าอยู่ระหว่าง 4.36×10^{5} ถึง 1.17×10^{8} ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ EFSA กำหนด โดยกลุ่มเด็กเล็กช่วงอายุ 3–5.9 ปี เป็นกลุ่มที่มีค่า MOE ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงอายุอื่น ในขณะที่ปัจจัยด้านเพศพบว่าเพศชายมีค่า MOE ต่ำกว่าเพศหญิงเล็กน้อยในภาพรวม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการได้รับสัมผัสเบนโซเอไพรีนที่สูงกว่า นอกจากนี้ในสถานการณ์ที่ 4 ที่มีความเสี่ยงที่สุด พบว่าค่า MOE มีระดับต่ำกว่าสถานการณ์ที่ 1 ซึ่งเป็นสถานการณ์ปกติอย่างชัดเจนในทุกกลุ่มประชากร อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินในทุกกรณีศึกษายังคงอยู่ในเกณฑ์ที่มีความเสี่ยงต่ำมากและยอมรับได้ตามแนวทางของสหภาพยุโรป

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีชี้วัดขอบเขตของความปลอดภัยของการได้รับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีนจากการบริโภคหมูปิ้งภายใต้ 4 สถานการณ์จำลอง

คุณลักษณะประชากร	ต่อประชากรทั้งหมด				เฉพาะผู้ที่บริโภคจริง			
	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2	สถานการณ์ที่ 3	สถานการณ์ที่ 4	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2	สถานการณ์ที่ 3	สถานการณ์ที่ 4
อายุ								
3 - 5.9 ปี	8.17×10^6	3.87×10^6	1.84×10^6	8.72×10^5	1.82×10^6	8.61×10^6	9.21×10^5	4.36×10^5
6 - 12.9 ปี	1.31×10^7	6.22×10^6	2.77×10^6	1.31×10^6	2.90×10^6	1.37×10^6	1.78×10^6	8.43×10^5
13 - 17.9 ปี	1.77×10^7	8.37×10^6	3.99×10^6	1.89×10^6	3.99×10^6	1.89×10^6	1.90×10^6	9.00×10^5
18 - 34.9 ปี	2.60×10^7	1.23×10^7	5.90×10^6	2.79×10^6	4.58×10^6	2.17×10^6	1.68×10^6	7.97×10^5
35 - 64.9 ปี	6.24×10^7	2.95×10^7	7.91×10^6	3.74×10^6	6.15×10^6	2.91×10^6	3.39×10^6	1.61×10^6
65 ปีขึ้นไป	1.17×10^8	5.53×10^7	1.39×10^7	6.58×10^6	7.09×10^6	3.36×10^6	2.98×10^6	1.41×10^6
เพศ								
ชาย	3.31×10^7	1.57×10^7	5.54×10^6	2.62×10^6	4.74×10^6	2.25×10^6	3.17×10^6	1.50×10^6
หญิง	3.67×10^7	1.74×10^7	5.98×10^6	2.83×10^6	1.74×10^7	2.45×10^6	2.99×10^6	1.42×10^6

อภิปรายผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าประชากรในกรุงเทพฯ และปริมณฑลมีความเสี่ยงต่อการก่อมะเร็งจากการบริโภคหมูปิ้งในระดับต่ำ (MOE > 10,000) แม้ในสถานการณ์ความเสี่ยงสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารเบนโซเอไพรีน ที่ตรวจพบต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ EU และจีน อย่างมีนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าสภาวะการปรุงและลักษณะการปิ้งย่างหมูปิ้งที่จำหน่ายในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลในปัจจุบัน ยังไม่ก่อให้เกิดการสะสมของสารก่อมะเร็งในระดับที่เป็นอันตรายร้ายแรง อย่างไรก็ตาม กลุ่มเด็กเล็กในช่วงอายุ 3–5.9 ปี เป็นกลุ่มที่ควรเฝ้าระวังสูงสุดเนื่องจากมีค่า MOE ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลจากสัดส่วนน้ำหนักตัวที่น้อย จึงได้รับสัมผัสสารต่อหน่วยน้ำหนักสูงกว่าผู้ใหญ่ แม้จะมีปริมาณการบริโภคที่น้อยกว่าก็ตาม แต่เด็กเล็กเป็นกลุ่มเปราะบางที่มีความเสี่ยงสะสมในระยะยาวมากกว่าผู้ใหญ่ ส่วนในด้านปัจจัยทางเพศ พบว่าเพศชายมีความเสี่ยงสูงกว่าเพศหญิงเล็กน้อยจากพฤติกรรมการบริโภคที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของกรมอนามัยเรื่องการประเมินความเสี่ยงจากโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ในอาหารปิ้งย่างพื้นที่ภาคเหนือ ที่ระบุว่าชายไทยมีโอกาสเสี่ยงต่อโรคมะเร็งจากการบริโภคอาหารปิ้งย่างและหมูปิ้งสูงกว่าหญิงไทยในทุกประเภท ยกเว้นกรณีของไส้อั่วย่าง[12] แต่จากการวิเคราะห์ในกลุ่มผู้บริโภคจริง (eater only) ภายใต้สถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูง (high-risk scenarios) กลับพบว่าเพศหญิงมีระดับการได้รับสัมผัสสารสูงกว่าเพศชายเล็กน้อย

ทั้งนี้ ข้อจำกัดสำคัญของงานวิจัยนี้คือ การประเมินจากแหล่งอาหารเพียงชนิดเดียว ซึ่งในความเป็นจริงประชากรอาจได้รับสารเบนโซเอไพรีน สะสมเพิ่มเติมจากอาหารปิ้งย่างประเภทอื่น หรือจากมลพิษทางอากาศในเขตเมือง นอกจากนี้ ปริมาณเบนโซเอไพรีนที่ตรวจพบมีความแปรผันตามกระบวนการผลิต เช่น ระดับความร้อนและระยะเวลาที่ใช้ รวมถึงชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่พบว่าการเลือกใช้ถ่านคุณภาพสูงหรือถ่านไม้ยูคาลิปตัสสามารถลดการเกิดสารก่อมะเร็งได้ดีกว่าถ่านไม้ทั่วไป[13] รวมถึงสูตรส่วนประกอบในการหมัก ส่งผลต่อปริมาณเบนโซเอไพรีน หรือสูตรหมักที่มีส่วนผสมที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ เช่น กระเทียมหรือเครื่องเทศมีส่วนช่วยลดการเกิดสาร เบนโซเอไพรีน ในระหว่างการปิ้งย่างได้[14]

อีกทั้ง การประเมินการได้รับสัมผัสในงานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลการบริโภคอาหารจากการสำรวจการบริโภคอาหารของประชากรไทยที่จัดทำโดย มกอช. ในปี พ.ศ. 2559 ซึ่งอาจไม่สะท้อนรูปแบบการบริโภคของประชากร

ในปัจจุบันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากพฤติกรรมการบริโภคอาหารอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพเศรษฐกิจ สังคม และวิถีชีวิตของประชากรในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้น หากมีการศึกษาในอนาคต ควรดำเนินการสำรวจข้อมูลการบริโภคอาหารจากประชากรในพื้นที่ศึกษาโดยตรง หรือใช้ข้อมูลการบริโภคที่มีการปรับปรุงล่าสุด เพื่อให้ข้อมูลการบริโภคมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการบริโภคจริงของประชากรเป้าหมายมากยิ่งขึ้น และช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินการได้รับสัมผัสและการประเมินความเสี่ยง

สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการปนเปื้อนของสารเบนโซเอไพรีนในหมูปิ้งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยของสหภาพยุโรปและสาธารณรัฐประชาชนจีนอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการประเมินลักษณะความเสี่ยงต่อการก่อมะเร็ง ในทุกกลุ่มประชากรและทุกสถานการณ์จำลองอยู่ในระดับที่ต่ำและยอมรับได้ในเชิงสาธารณสุข ทั้งนี้กลุ่มเด็กเล็ก (3–5.9 ปี) เป็นกลุ่มที่ควรเฝ้าระวังสูงสุดเนื่องจากปัจจัยด้านน้ำหนักตัวที่น้อย ส่งผลให้มีโอกาสได้รับสัมผัสสารต่อหน่วยน้ำหนักตัวสูงกว่ากลุ่มอื่น ซึ่งสะท้อนว่าพฤติกรรมการบริโภคและปัจจัยทางสรีระเป็นตัวแปรสำคัญต่อระดับความเสี่ยงทางสุขภาพในระยะยาว

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อแนะนำสำหรับภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (Regulatory & Policy Recommendations)

1.1 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรใช้ข้อมูลจากการศึกษานี้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิงในการกำหนดระดับปริมาณสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Level: ML) หรือเกณฑ์คำแนะนำ (Guideline values) สำหรับสารเบนโซเอไพรีน ($B[a]P$) ในอาหารปิ้งย่างของประเทศไทย

1.2 ห้องปฏิบัติการสามารถใช้ข้อมูลการตรวจวิเคราะห์นี้ ในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ (เช่น การกำหนดค่า LOD และ LOQ) ให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลของสหภาพยุโรป (EU Commission Regulation) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัด และยกระดับการตรวจวิเคราะห์

1.3 ขยายขอบเขตการเฝ้าระวัง ไปยังอาหารริมทาง หรือ อาหารประเภทอื่น รวมถึงเพิ่มการตรวจวิเคราะห์ PAHs ชนิดอื่น เพื่อควบคุมมาตรฐานความปลอดภัยอาหารของประเทศ และจัดทำแนวปฏิบัติที่ดี (Good Practice Guideline) เพื่อเป็นความรู้ในการปรุงอาหารให้ปลอดภัยสำหรับร้านอาหารและผู้บริโภค

2. ข้อแนะนำสำหรับผู้ประกอบการและร้านค้า (Vendor & Operator Recommendations)

ผู้ประกอบการและร้านค้า สามารถใช้ข้อมูลจากการศึกษานี้ สำหรับปรับเปลี่ยนวิธีการปรุงอาหารเพื่อลดการเกิดสารก่อมะเร็งในอาหาร

2.1 ควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาในการปิ้งย่าง/ทอดอย่างเข้มงวด เพื่อไม่ให้เกิดรอยไหม้เกรียม (Charring) ที่มากเกินไป

2.2 ลดการใช้ไขมันหรือน้ำมันที่มากเกินไป และหาวิธีป้องกันไม่ให้ไขมันจากเนื้อสัตว์หยดลงไปโดนแหล่งความร้อนโดยตรง

2.3 เปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงไร้ควัน แทนการใช้ถ่านทั่วไป

2.4 เปลี่ยนสูตรหมักเนื้อสัตว์ เน้นการหมักด้วยสมุนไพรที่มีสมบัติต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant)

3. ข้อแนะนำสำหรับผู้บริโภค (Consumer Recommendations)

3.1 ผู้บริโภคควรเลือกบริโภคเนื้อสัตว์เนื้อแดงล้วนหรือส่วนที่มีไขมันน้อย (Lean meat) หลีกเลี่ยงเนื้อส่วนที่มีไขมันสูง เนื่องจากสาร B[a]P มักจะสะสมได้ดีในส่วนที่เป็นไขมัน รวมถึง ตัดส่วนที่ไหม้เกรียมหรือรอยดำจากการปิ้งย่างทิ้งก่อนรับประทานทุกครั้ง

3.2 ผู้บริโภคควรปรับเปลี่ยนวิธีการประกอบอาหาร โดยใช้การการต้ม นึ่ง หรือ อบ แทนที่การปิ้งย่าง หรือ ทอด

3.3 ผู้ปกครองและผู้บริโภคควรควบคุมความถี่และปริมาณในการบริโภคหมูปิ้งของเด็กเล็กให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม หลีกเลี่ยงการให้เด็กบริโภคส่วนที่ไหม้เกรียม และควรส่งเสริมการบริโภคอาหารที่หลากหลาย เพื่อลดพฤติกรรมการได้รับสัมผัสสารพิษชนิดเดียวซ้ำๆ ในระยะยาว เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีความเสี่ยงในการรับสัมผัสสารเบนโซเอไพรีนต่อน้ำหนักตัวสูงที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. International Agency for Research on Cancer. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. Lyon (FR): IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans [Internet]. 2010 [cited 2026 Mar 14]; (92):853. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK321712/
2. International Agency for Research on Cancer. Chemical agents and related occupations. Lyon (FR): IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans [Internet]. 2012 [cited 2026 Mar 14]; (100F):599. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304416/
3. European Food Safety Authority. Polycyclic aromatic hydrocarbons in food: scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. EFSA J [Internet]. 2008 [cited 2026 Mar 14]; 6(8): 724. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304416/doi:10.2903/j.efsa.2008.724.
4. European Commission. Commission regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006. Off J Eur Union [Internet]. 2023 [cited 2026 Mar 14]; L119:1-57. Available from: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng
5. National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 2762-2022: National food safety standard - maximum levels of contaminants in foods. Beijing: Standards Press of China; 2022.
6. Liu G, Niu Z, Van Niekerk D, Xue J, Zheng L. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal combustion: emissions, analysis, and toxicology. Rev Environ Contam Toxicol [Internet]. 2008 [cited 2026 Mar 15]; 192:1-28. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18020302/ doi: 10.1007/978-0-387-71724-1_1. PMID: 18020302
7. Hamidi EN, Hajeb P, Selamat J, Lee SY, Abdull Razis AF. Bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled meat: the effects of meat doneness and fat content. Int J Environ Res Public Health [Internet]. 2022 [cited 2026 Mar 15]; 19(2):736. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35055557/ doi: 10.3390/ijerph19020736. PMID: 35055557; PMCID: PMC8775937
8. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. รายงานการสำรวจการบริโภคอาหารของประชากรไทย พ.ศ. 2559. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2559.
9. Thamsorn S, Phucharoenrak P, Winuprasith T, Trachootham D. Grilled plant (Soy, Rice, Corn)-Based patties contain lower amounts of heterocyclic aromatic amines but not polycyclic aromatic hydrocarbons than grilled beef patties. Food Control. 2024;161.
10. AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International. 22nd ed [Internet]. MD: AOAC International; 2023 [cited 2026 Apr 2]. Available from: https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/
11. European Food Safety Authority. Opinion of the Scientific Committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic. EFSA J [Internet]. 2005 [cited 2026 Mar 14]; 3(10):282. Available from: https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2005.282 doi:10.2903/j.efsa.2005.282
12. กองประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ กรมอนามัย. รายงานการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ของประชาชนจากการปิ้งย่างอาหาร. นนทบุรี: กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข; 2564.
13. Huong Huynh TT, Tongkhao K, Hengniran P, Vangnai K. Assessment of High-temperature Refined Charcoal to Improve the Safety of Grilled Meat Through the Reduction of Carcinogenic PAHs. J Food Prot [Internet]. 2023 [cited 2026 Mar 18]; 86(12):100179. Available from:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0362028X23068631 doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100179
14. Wongmaneepratip W, Na Jom K, Vangnai K. Inhibitory effects of dietary antioxidants on the formation of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled pork. Asian-Australas J Anim Sci [Internet]. 2019 [cited 2026 Mar 18]; 32(8):1205-10. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30744337/ doi: 10.5713/ajas.18.0805. Epub 2019 Feb 7. PMID: 30744337; PMCID: PMC6599948
15. กนิษฐพร วังใน, วรพจน์ สุนทรสุข, บุษบา ยงสมิทธ์, วราภา มหากาญจนกุล. การพัฒนาวิธีวิเคราะห์สารเบนโซเอไพรีนในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ปิ้งย่าง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 2552;40(3)(พิเศษ):137-140.