ฉายภาพทัศน์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อการผลิตข้าวนาปีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Projection Impact of Climate Change in the Future under Greenhouse Gas Emissions Scenarios on Rice in-Season Production in Northeastern Thailand

ธนากร แสนสาร วราภรณ์ นันทะเสน เก นันทะเสน และนิโรจน์ สินณรงค์*

Thanakorn Saensan Waraporn Nunthasen Ke Nunthasen and Nirote Sinnarong*

สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์ประยุกต์ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Department of Applied Economics, Faculty of Economics, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

* Corresponding author: nirote@mju.ac.th

(Received: 20 September 2023; Revised: 2 January 2024; Accepted: 9 February 2024)

Abstract

This study aimed to analyze the projected impact and risks of climate change on in-season rice production in Northeastern Thailand, via production function analysis with Feasible Generalized Least Squares (FGLS) estimators. The analysis was based on panel data from 19 provinces in the region, covering the period from 2002 to 2020. The results of the study showed that area harvested, trend time, and cumulative precipitation had a positive effect on the yield of in-season rice yields, and it was a statistically significant risk-decreasing factor for rice production variance. On the other hand, average temperature and variance of the average temperature negatively affect the production of in-season rice yields, and there was a statistically significant increase in the risk of variance in rice production. The results of the numerical simulation found that in the 2030s and 2050s, the effects of climate change will cause yields to decrease by 1.470 percent and 2.003 percent, respectively, causing production losses of 8,049.72 tons, equivalent to economic value. 74.41 million baht and 10,973.34, representing an economic value of 101.44 million baht. This work is only a presentation of the impacts of climate change and a projection of future impacts. As an impact result, farmers and policymakers should have good practices for rice cultivation that are consistent with climate change in order to deal with future problems in a sustainable way.

Keywords: Rain-fed rice production, climate change, impact and risk, northeastern Thailand

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการคาดการณ์ผลกระทบและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวนาปีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ด้วยการวิเคราะห์ฟังก์ชันการผลิตด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดทั่วไปแบบเป็นไปได้ เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความแปรปรวนของค่าความความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ โดยใช้ข้อมูลแบบพาเนล จำนวน 19 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ค.ศ. 2005 - 2020) และการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงในอนาคตของการผลิตข้าวภายใต้สถานการณ์สภาพอากาศที่แตกต่างกัน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสภาพอากาศจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐมิติ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ปลูกข้าว แนวโน้มของเวลา และปริมาณน้ำฝนสะสมเฉลี่ยในฤดูการผลิต มีผลกระทบเชิงบวกต่อผลผลิตข้าวนาปี และเป็นตัวแปรลดความเสี่ยงจากความแปรปรวนต่อ

การผลิตข้าวนาปีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกันตัวแปร อุณหภูมิเฉลี่ย และความแปรปรวนอุณหภูมิเฉลี่ยมีผลกระทบเชิงลบต่อผลผลิตข้าวนาปีและเป็นตัวแปรเพิ่มความเสี่ยงจากความแปรปรวนต่อการผลิตข้าวนาปี ผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่า ในช่วงทศวรรษที่ 2030 และ 2050 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศทำให้ผลผลิตลดลงร้อยละ 1.470 และ 2.003 ตามลำดับ ก่อให้เกิดความเสียหายจากผลผลิตลดลง 8,049.72 ตัน คิดเป็นมูลค่า 74.41 ล้านบาท และ 10,973.34 คิดเป็นมูลค่า 101.44 ล้านบาท งานชิ้นนี้เป็นเพียงการนำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและคาดการณ์จำลองผลกระทบในอนาคต จากผลกระทบดังกล่าว เกษตรกรและผู้กำหนดนโยบายควรมีแนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการเพาะปลูกข้าวที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อรับมือปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การผลิตข้าวนาปี การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ผลกระทบและความเสี่ยง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นหนึ่งในความท้าทายที่สำคัญที่สุดที่มนุษยชาติต้องเผชิญในปัจจุบัน โดยมีผลกระทบที่เกิดขึ้นทั่วโลกแล้ว การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนากลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อจัดการความเสี่ยงของการผลิตพืชผลเมื่อเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากข้อมูล NOAA National Centers for Environmental Information (2023) ความผิดปกติของอุณหภูมิแสดงถึงความแตกต่างจากอุณหภูมิเฉลี่ยหรือค่าอุณหภูมิพื้นฐาน ความผิดปกติเชิงบวกแสดงว่าอุณหภูมิที่สังเกตได้อุ่นกว่าค่าพื้นฐาน เกษตรกรจึงต้องเผชิญกับความเสี่ยงที่มากขึ้นต่อพืชผล ในภาคการเกษตรความเสี่ยงมีหลายรูปแบบโดยเฉพาะด้านการผลิต การตลาด การเงิน สถาบัน และความเสี่ยงส่วนบุคคล (Komarek *et al*., 2020) และยังต้องเผชิญผลกระทบทางลบที่ไม่แน่นอนเนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น ภูมิอากาศ แมลงศัตรูพืช และโรค ของตัวแปรทางชีวภาพ ภูมิอากาศ ราคาสินค้าเกษตรที่ไม่อาจคาดเดาโดยที่เกษตรกรไม่สามารถควบคุมราคาตลาดได้ (Baethgen *et al*., 2008) ซึ่งเป็นความเสี่ยงที่เกษตรกรต้องแบกรับ หากขาดการวางแผนรับมือกับปัญหา

การทำการเกษตรในประเทศไทยนั้นเป็นการเกษตรแบบพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติและสภาพอากาศในพื้นที่เป็นหลัก ดังนั้นภาคการผลิตทางการเกษตรจึงนับเป็นภาคส่วนที่มีความเสี่ยงสูงจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องมีการส่งเสริมความรู้เพื่อสร้างความตระหนักต่อผลกระทบความเสี่ยงและหาแนวทางการปรับตัวที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ เพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์ความไม่ปกติของสภาพภูมิอากาศที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต (Sinnarong *et al*., 2022) อันได้แก่ การเข้าถึงแหล่งน้ำ เทคโนโลยีการผลิตโรงเรือนควบคุมสภาพอากาศ เป็นต้น

ตามรายงานการประเมินฉบับที่ 6 (The Sixth Assessment Report, AR6: 2022) ของ IPCC ระบุว่าอุณหภูมิพื้นผิวโลกจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปจนถึงอย่างน้อยกลางศตวรรษที่ 21 ซึ่งในสถานการณ์ระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกันจะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระดับที่แตกต่างกัน ในภาวะโลกร้อนที่รุนแรงเช่นนี้จะมีผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อระบบนิเวศและสังคมทั่วโลก หากปล่อยไว้ต่อไปย่อมมีผลต่อการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพาะปลูกข้าวนาปีที่ต้องอาศัยฝนฟ้าอากาศเป็นปัจจัยหลัก ดังนั้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างเร่งด่วนเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่รุนแรงที่สุดของภาวะโลกร้อน ในการนี้ AR6 ได้นำเสนอข้อมูลคาดการณ์สภาพอากาศตามสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก อันเป็นประโยชน์ในการศึกษาผลกระทบสภาพอากาศที่เกิดขึ้น Sinnarong (2023) ได้นิยามชื่อภาษาไทยว่า “เส้นทางการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมแบบร่วมแบ่งปัน (Shared Socioeconomic Pathway; SSP)” แบ่งออกเป็น 5 ระดับตามข้อสมมุติฐานการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมและ

การลดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศรวมถึงการควบคุมมลพิษทางอากาศ ได้แก่สถานการณ์ SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 โดยที่ระดับ SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 เป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง โดยระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ระหว่างปี ค.ศ. 2050 - 2100 ในขณะที่ระดับ SSP2-4.5 เป็นระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับปานกลาง โดยที่การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับในระดับปัจจุบันจนกระทั่งถึงกลางศตวรรษที่ 21 ที่เป็นสถานการณ์ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับต่ำและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจนถึงระดับคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์ (Net zero) ในปี ค.ศ. 2050 และสุดท้ายระดับ SSP1-1.9 และ SSP1-2.6 เป็นระดับที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นลบ ซึ่งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดนั้นเชื่อมโยงระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอันเป็นผลกระทบสืบเนื่องกันจากชั้นบรรยายกาศที่ทำให้โลกร้อนขึ้นนั้นเอง ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงประโยชน์จากการใช้ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นเพื่อคาดการณ์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่มีต่อการผลิตข้าว

แม้ว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวในบางภูมิภาคของประเทศไทย (Pakeechai *et al.*, 2020; Puphoung *et al.*, 2019; Sinnarong *et al.*, 2019; Sinnarong *et al.*, 2022) แต่ทว่าการศึกษาดังกล่าวนั้น ใช้ข้อมูลประมาณการณ์จากสถานีตรวจวัดอากาศซึ่งไม่ได้ครอบคลุมทุกพื้นที่เป็นเพียงข้อมูลเฉลี่ยรวมเท่านั้น ซึ่งไม่ได้สะท้อนอิทธิพลที่เกิดจากความแตกต่างของพื้นที่ได้อย่างชัดเจน ด้วยการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากดาวเทียมวิเคราะห์ซ้ำนี้จะสามารถสะท้อนสภาพที่เกิดขึ้นจริงตามแต่ละพื้นที่ทุกช่วงเวลาได้ อีกทั้งยังไม่มีงานใดที่นำข้อมูลการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของ AR6 มาใช้ศึกษาจำลองผลกระทบดังกล่าว เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ใหม่สำหรับการศึกษาในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการเติมเต็มช่องว่างการวิจัยด้านความเที่ยงตรงของข้อมูลที่ศึกษาอีกทั้งยังเป็นการทบทวนยืนยันผลกระทบและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวนาปี โดยใช้พื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นตัวแทนของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศ อีกทั้งยังเป็นแหล่งผลิตข้าวนาปีที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทย บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคาดการณ์ผลกระทบและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวนาปีภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย โดยประยุกต์กรอบทฤษฎีฟังก์ชันการผลิต Stochastic Production Function (Just and Pope, 1978) และใช้การวิเคราะห์ทางเศรษฐมิติแบบข้อมูลพาเนลซึ่งรวมอิทธิพลพื้นที่ของข้อมูลภาคตัดขวางและอิทธิพลของอนุกรมเวลาเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสภาพอากาศและผลผลิตข้าวได้อย่างครอบคลุม ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถประมาณค่าที่เชื่อถือได้ของความสัมพันธ์ด้านสภาพอากาศและผลผลิตได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ศึกษา

1.1 ข้อมูลการผลผลิตข้าวนาปีรายจังหวัดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 19 จังหวัด ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 - 2020 จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ประกอบด้วย พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิตข้าว ผลผลิตเฉลี่ย

1.2 ข้อมูลสภาพอากาศในอดีตโดยใช้ชุดข้อมูลวิเคราะห์ซ้ำสภาพภูมิอากาศ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 - 2020 ของ ERA5 Ag 9.6 km รายวัน ซึ่ง ERA5 คือ ระบบวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศที่ถูกพัฒนาโดย ECMWF หรือ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts โดยระบบนี้มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงขึ้นและมีการติดตามสภาพภูมิอากาศทั่วโลก (Boogaard *et al.*, 2020) และข้อมูลสภาพอากาศในอนาคตจากการสมมุติเหตุการณ์ของ CMIP6 ซึ่งย่อมาจาก Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 ซึ่งเป็นโครงการที่รวบรวมและเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพภูมิอากาศจากหลาย ๆ แหล่งต่างกัน เพื่อให้เราสามารถเข้าใจและปรับปรุงความแม่นยำของการจำลองสภาพ

ภูมิอากาศได้ดียิ่งขึ้น ที่ข้อมูลนั้นถูกเผยแพร่โดย World Bank (2022) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตาม “เส้นทางการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมแบบร่วมแบ่งปัน (Shared Socioeconomic Pathway, SSP)” ตามรายงานการประเมินฉบับที่ 6 (AR6) จำนวน 3 ระดับ เป็นตัวแทนของสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ได้แก่ SSP1-1.9 เป็นระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นลบ SSP2-4.5 เป็นระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระดับปานกลาง และ SSP5-8.5 เป็นระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระดับสูงสุด ประกอบด้วยข้อมูล อุณหภูมิเฉลี่ย ปริมาณน้ำฝน

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบทั่วไปที่เป็นไปได้ (Feasible Generalized Least Squares; FGLS) เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความแปรปรวนของค่าความความคลาดเคลื่อนไม่คงที่ ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดแบบทั่วไปที่เป็นไปได้ เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการค่าเฉลี่ย ตามวิธีการศึกษาของ Sinnarong *et al.* (2022)

2.2 จำลองผลกระทบโดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสภาพอากาศจากผลของข้อมูลปีฐาน ซึ่งอยู่ในรูปร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของผลผลิต เมื่อตัวแปรสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 1 จึงมาเทียบกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในอนาคต จะได้ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในอนาคตต่อผลผลิต (effect-climate change)

3. การกำหนดแบบจำลองฟังก์ชันการผลิตแบบ Stochastic Production Function (SPF)

จากแนวคิดฟังก์ชันการผลิตของ Just and Pope (1979) กำหนดรูปแบบฟังก์ชันการผลิตแบบ Stochastic Production Function (SPF) หรือ $y = f(x, v)$ เมื่อ x เป็นเวกเตอร์ของปัจจัยการผลิตทั่วไป เช่น ที่ดิน ทุน แรงงาน และ v เป็นเวกเตอร์ของปัจจัยการผลิตที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ สภาพอากาศในพื้นที่เพาะปลูกทั้งนี้เพื่อนำปัจจัยเชิงสุ่มที่จะส่งผลต่อความไม่แน่นอนในการผลิต เช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ (Battese *et al.*, 1997; Jatuporn and Takeuchi, 2022; Yu *et al.*, 2022) เพื่อให้ได้ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อผลผลิตข้าว โดยกำหนดให้อิทธิพลของตัวแปรอื่นที่ไม่ได้นำเข้ามาวิเคราะห์เป็นค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงได้จัดรูปแบบของสมการให้อยู่ในรูปแบบ Double-Log

3.1 สมการผลผลิตเฉลี่ย (Mean Production Function)

$$\begin{aligned}\ln Production_{it} &= \alpha_0 + \beta_a \ln Area_havest_{it} + \beta_b \ln Time_{it} \\ &+ \beta_c \ln Precipitation_{it} \\ &+ \beta_d \ln Variance_Precipitation_{it} \\ &+ \beta_e \ln Temp_{it} + \beta_f \ln Variance_Temp_{it} \\ &+ \mu_{it} + v_{it}\end{aligned}$$

โดยที่

lnProduction (ตัน)	คือ ผลผลิตข้าวรายจังหวัด i ณ ปีที่ t
lnArea_harvest	คือ พื้นที่ปลูกข้าวรายจังหวัด i ณ ปีที่ t (ไร่)
lnTime	คือ แนวโน้มของเวลา ซึ่งตัวแทนของเทคโนโลยีที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา เพิ่มขึ้นปีละ 1 โดยนับปีที่ 1 เป็น 1 จนกระทั่งปีสุดท้าย
lnPrecipitation	คือ ปริมาณน้ำฝนสะสมรายปี (มิลลิเมตร)
lnVariance_Precipitation	คือ ความแปรปรวนปริมาณน้ำฝนสะสมรายปี (มิลลิเมตร)^2
lnTemp	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี (องศาเซลเซียส)
lnVariance_Temp	คือ ความแปรปรวนอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี (องศาเซลเซียส)^2
u_{it}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเชิงสุ่มไม่สามารถสังเกตได้
i และ t	คือ พื้นที่แต่ละประเทศที่ i และ ณ เวลา t

วิเคราะห์ในโมเมนต์ที่สูงขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ฟังก์ชันความแปรปรวนของผลผลิต สามารถประยุกต์แนวคิดแบบจำลองเชิงโมเมนต์ของฟังก์ชันการผลิตตามแบบของ Antle (1983); Antle and Havenner (1983) ได้ดังสมการความแปรปรวนของผลผลิต โดยที่ u^2 คือ ความแปรปรวนของผลผลิตเฉลี่ย

3.2 สมการความแปรปรวนผลผลิตเฉลี่ย (Variance Function)

$$
\begin{aligned}
&{u_{it}}^2 \\
&= \alpha_0 + \beta_a \ln Area_havest_{it} + \beta_b \ln Time_{it} \\
&+ \beta_c \ln Precipitation_{it} \\
&+ \beta_d \ln Variance_Precipitation_{it} \\
&+ \beta_e \ln Temp_{it} + \beta_f \ln Variance_Temp_{it} \\
&+ e_i
\end{aligned}
$$

ผลการวิจัยและวิจารณ์

จาก Table 1 ผลแบบจำลองฟังก์ชันผลผลิตเฉลี่ยโดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบทั่วไปที่เป็นไปได้ (FGLS) โดยได้ควบคุมปัญหาความแตกต่างที่เกิดขึ้น (heteroskedasticity) และปัญหาอัตสหสัมพันธ์ภายในข้อมูล (autocorrelation) ในกรณีละเมิดเงื่อนไขอันดับที่ 1 (AR1) ช่วงปี ค.ศ. 2002 - 2020 ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้รูปแบบจำลอง Cobb-Douglas เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยการผลิตข้าว โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์ (β) แสดงถึงความยืดหยุ่นของปัจจัยการผลิตข้าวนาปีที่มีต่อเปลี่ยนแปลงไปร้อยละปริมาณผลผลิตข้าว ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรพื้นที่ปลูกข้าว (β_a = 0.98961) มีผลกระทบเชิงบวกต่อร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปีอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sinnarong *et al.* (2019) ที่ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศต่อการผลิตข้าวภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ช่วงปี ค.ศ. 1989-2009 และ Sinnarong *et al.* (2022) ได้ศึกษาเพิ่มเติมในช่วงปี ค.ศ. 1989 - 2017 เช่นเดียวกับ Pakeechai *et al.* (2020) ที่ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศต่อการผลิตข้าวภาคกลาง ช่วงปี ค.ศ. 1987 - 2017 และ Puphoung *et al.* (2019) ที่ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศต่อการผลิตข้าวภาคเหนือ ช่วงปี ค.ศ. 1987 - 2017 โดยให้ผลการศึกษาตรงกันว่าพื้นที่ปลูกข้าวมีผลกระทบเชิงบวกต่อผลผลิตข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีอุปทานสินค้าเกษตรและทฤษฎีการผลิต เมื่อพิจารณาตัวแปรแนวโน้มของเวลา (trend time) (β_b = 0.0311) มีผลกระทบเชิงบวกต่อร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปี อย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Puphoung *et al.* (2019); Pakeechai *et al.* (2020) และ Sinnarong *et al.* (2022) พบว่า ตัวแปรแนวโน้มเวลาหรือการพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตรข้าวเป็นตัวแปรลดผลกระทบและความเสี่ยงที่ผลผลิตจะลดลง (downside risk) จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นในอนาคต แสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยีการผลิตมีผลต่อระดับผลผลิตข้าวนาปีเฉลี่ยในทิศทางเดียวกันและมีส่วนสำคัญในการผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต ซึ่งเป็นตามทฤษฎีการผลิตเมื่อคำนึงถึงเทคโนโลยีตามกฎของอุปทาน เมื่อพิจารณาตัวแปรกลุ่มตัวแทนการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ อันได้แก่ ปริมาณน้ำฝนสะสม ความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนสะสม อุณหภูมิเฉลี่ย และความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ย ตัวแปรแรก ปริมาณน้ำฝนสะสม (β_c = 0.4159) มีผลกระทบเชิงบวกต่อร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปี อย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sinnarong *et al.* (2019) Puphoung *et al.* (2019) Pakeechai *et al.* (2020) และ Sinnarong *et al.* (2022) ปริมาณน้ำฝนสะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตข้าว ต่อมาความแปรปรวนปริมาณน้ำฝนสะสม (β_d = 0.00167) มีผลกระทบเชิงบวกต่อร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปีอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 ถัดมา อุณหภูมิเฉลี่ย (β_e = -0.30369) มีผลกระทบเชิงลบต่อร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปี อย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 สอดคล้องกับงานของ Sinnarong *et al.* (2019) และ Puphoung *et al.* (2019) เช่นเดียวกับในกรณีผลการศึกษาของ Pakeechai *et al.* (2020) ที่ใช้อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเป็นตัวแทนก็มีผลกระทบเชิงลบต่อผลผลิตข้าวนาปีและเป็นตัวแปรเพิ่มความเสี่ยงจากความ

แปรปรวนต่อการผลิตข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ได้มีผลการศึกษาของ Sinnarong *et al.* (2022) ที่ได้ระบุถึงทิศทางของผลกระทบเชิงบวกต่อผลผลิตข้าวนาปีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ช่วงปี ค.ศ. 1989 - 2017 แม้จะไม่ได้มีนัยสำคัญก็ และสุดท้ายความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ย (β_f = 0.00040) มีผลกระทบเชิงลบต่อร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปีอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 กล่าวโดยสรุปแล้ว พื้นที่ปลูกข้าวและแนวโน้มของเวลามีผลเชิงบวกต่อผลผลิตข้าว ต่อมาเมื่อพิจารณาตัวแปรกลุ่มน้ำฝนจะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำสะสมและความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนสะสมมีผลเชิงบวกต่อผลผลิตข้าวนาปี ถัดไปเมื่อพิจารณาตัวแปรกลุ่มอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิเฉลี่ยและความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ยมีผลเชิงลบต่อผลผลิตข้าวนาปี อย่างไรก็ตาม เมื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลผลิตเฉลี่ยข้าวนาปีทั้งสามกรณีจากฟังก์ชันผลผลิตเฉลี่ยแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความเสี่ยงจากความแปรปรวนของผลผลิตข้าวนาปี

การผลการวิเคราะห์แบบจำลองความเสี่ยงจากความแปรปรวนของผลผลิตข้าวนาปี (variance production model) โดยใช้รูปแบบสมการแบบ Cobb-Douglas จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบพาเนล (PLS) โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์ (β) หากมีประมาณค่าเชิงบวก แสดงถึงตัวแปรอธิบายเป็นตัวแปรที่ส่งผลในการเพิ่มความแปรปรวนของผลผลิตข้าวนาปี หรือ ตัวแปรเพิ่มความเสี่ยง (risk-increased variables) ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรแนวโน้มของเวลา (trend time) (β_b = -0.00428) เป็นตัวแปรลดความเสี่ยงของร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปีอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.01 กล่าวคือ ถัดมาเมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิเฉลี่ย (β_e = -0.08601) เป็นตัวแปรลดความเสี่ยงของร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปี อย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ในทางตรงกันข้ามความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ย (β_f = 0.00077) เป็นตัวแปรเพิ่มความเสี่ยงของร้อยละปริมาณผลผลิตข้าวนาปี อย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จากผลการศึกษาข้างต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Puphoung *et al.* (2019); Pakeechai *et al.* (2020) และ Sinnarong *et al.* (2022)

Table 1 Mean Production and Variance Function of Rice In-Season Production

Variables	FGLS Regression: Heteroskedastic with Cross-sectional and AR(1) Correlation	Variance production model
In-season area harvested (Rai)	0.98961***	-0.00124
	(0.00181)	(0.00122)
Trend time (Technology change)	0.03110***	-0.00428***
	(0.00041)	(0.00093)
Cumulative precipitation (mm.)	0.04159***	-0.00147
	(0.00142)	(0.00382)
Precipitation variance (mm^2)	0.00167***	0.00017
	(0.00006)	(0.00032)
Average temperature (°C)	-0.30369***	-0.08601**
	(0.01445)	(0.03554)

Table 1 Mean Production and Variance Function of Rice In-Season Production (Cont.)

Variables	FGLS Regression: Heteroskedastic with Cross-sectional and AR(1) Correlation	Variance production model
Average temperature variance (°C^2)	-0.00040***	0.00077**
	(0.00007)	(0.00034)
Constant	-0.27797***	0.32921***
	(0.05105)	(0.11942)
Observations	361	361
R-squared	Not Applicable	0.1187
Adjusted R-squared	Not Applicable	0.1038
Model significance	Wald χ^2 (6) = 478179***	F (6, 354) = 7.951***

Remarks: 1) standard errors in parentheses. 2) *, **, and *** indicate that the significant at the 10%, 5%, and 1% level of significance.

จาก Table 2 จากข้อมูลแบบจำลองจากการรวบรวมแบบจำลองสภาพภูมิอากาศทั่วโลกของโครงการ Coupled Model Inter-comparison Projects (CMIP) ที่รองรับรายงานการประเมินครั้งที่ 6 ของ IPCC สังเกตได้ว่า ในอนาคตข้างหน้าอุณหภูมิเฉลี่ยและปริมาณน้ำฝนสะสมของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยปีฐาน ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือก 3 สถานการณ์เพื่อเป็นตัวแทนในการจำลองผลกระทบที่เกิดในขึ้นในอนาคต ได้แก่ SSP1-1.9 เป็นระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นลบ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากปีฐานร้อยละ 5.92 - 6.22 และปริมาณน้ำฝนสะสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.84 - 6.81 ถัดมา SSP2-4.5 เป็นระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระดับปานกลาง ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากปีฐานร้อยละ 6.11 - 8.38 และปริมาณน้ำฝนสะสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.95 - 15.08 สุดท้าย SSP5-8.5 เป็นระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระดับสูงสุด ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากปีฐานร้อยละ 6.45 - 10.23 และปริมาณน้ำฝนสะสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.99 - 14.80 ลำดับต่อไปจะนำการเปลี่ยนแปลงไปของตัวแปรร้อยละเทียบกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในอนาคต จะได้ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในอนาคตดัง Table 3

Table 2 Mean of baseline temperature and precipitation

Based 1983-2021	Rice in-season
Baseline temperature (°C)	26.50
Baseline precipitation (mm)	1,327.45
Baseline rice production (tons)	547,742.20
Baseline rice price (Baht/tons) (2004-2021)	9,243.79

Table 2 Mean of baseline temperature and precipitation (Cont.)

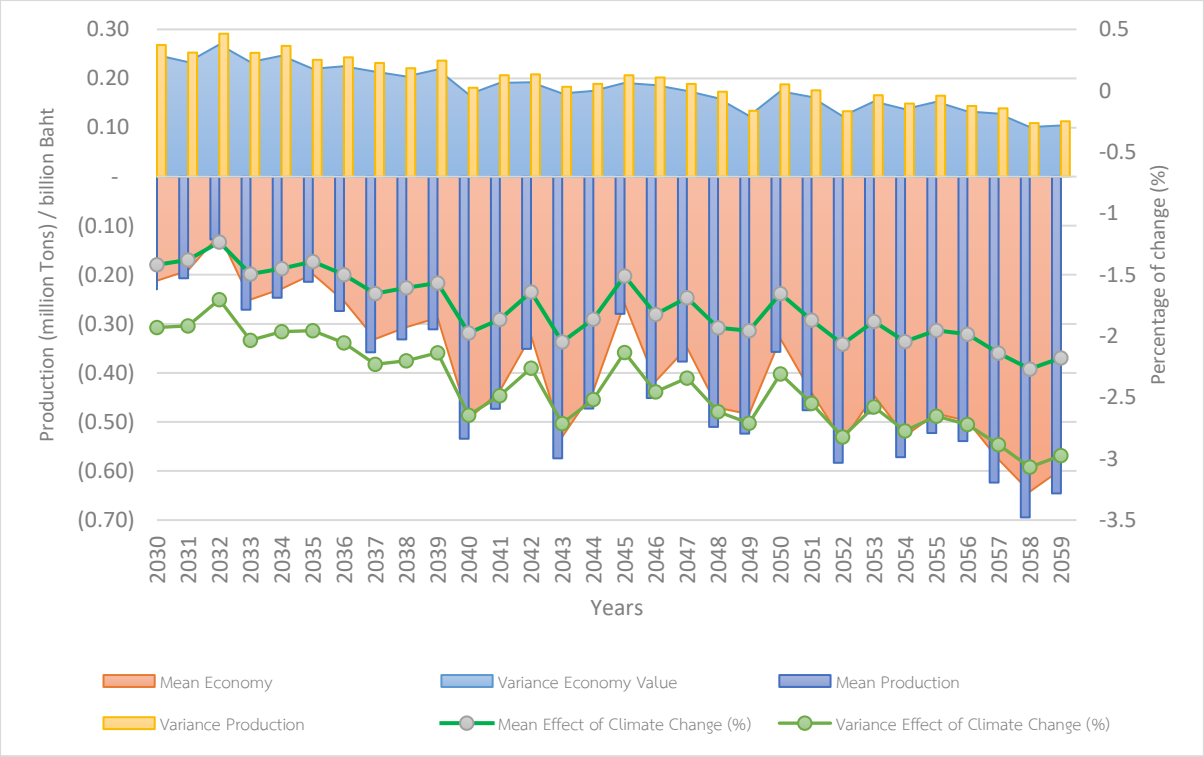
CMIP6	2030s	2050s
Temperature (SSP1.19: 50th)	28.07	28.15
Temperature (SSP2.45: 50th)	28.12	28.72
Temperature (SSP8.85: 50th)	28.21	29.21
Precipitation (SSP1.19: 50th)	1,365.28	1,417.97
Precipitation (SSP2.45: 50th)	1,499.31	1,527.58
Precipitation (SSP8.85: 50th)	1,499.92	1,523.87

Remarks: World Bank (2022) and result analysis

จาก Table 3 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงในอนาคตของการผลิตข้าวภายใต้สถานการณ์สภาพอากาศที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลช่วงทศวรรษที่ 2030 และ 2050 เนื่องจากเป็นปีเป้าหมายเชิงนโยบายของเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนที่มุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (carbon neutrality and net zero emission) เพื่อใช้ประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยและปริมาณน้ำฝนในอนาคตในการจำลองผลกระทบ (projected temperature and projected precipitation) โดยใช้ข้อมูลสถานการณ์ที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ได้แก่ SSP1.19 SSP2.45 และ SSP8.58 ซึ่งเรียงลำดับตามความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต ผลการศึกษาพบว่าในแบบจำลองฟังก์ชันผลผลิตเฉลี่ยจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยมีเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรผลผลิตเฉลี่ยลดลงร้อยละ 1.797 - 3.105 และเมื่อปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรผลผลิตเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.119 ถึง 0.627 เมื่อรวมผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากอิทธิพลของอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นส่วนใหญ่ลดลงร้อยละ 1.470 - 2.003 หากแสดงอยู่ในรูปของปริมาณผลผลิตเฉลี่ยคาดการณ์ในอนาคตปริมาณผลผลิตเฉลี่ยลดลง 8,049.72 - 10,973.34 ตัน หรือมูลค่าความเสียหายคาดการณ์ 74.41 - 101.44 ล้านบาท หากพิจารณาถึงความเสี่ยงจากความแปรปรวนของผลผลิตจากแบบจำลองฟังก์ชันความแปรปรวน ผลผลิตเฉลี่ยจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยมีเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรส่งผลให้ความเสี่ยงสูญเสียผลผลิตจากโอกาสความแปรปรวนผลผลิตเฉลี่ยลดลงร้อยละ 0.509 - 0.879 และเมื่อปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรส่งผลให้ความเสี่ยงสูญเสียผลผลิตจากโอกาสความแปรปรวนผลผลิตเฉลี่ยลดลงร้อยละ 0.004 - 4.165 หากแสดงอยู่ในรูปของปริมาณผลผลิตเฉลี่ยคาดการณ์ในอนาคตความแปรปรวนผลผลิตเฉลี่ยลดลง 2,976.25 - 7,500.17 ตัน หรือมูลค่าความเสียหายคาดการณ์ลดลง 27.51 - 69.33 ล้านบาท ดังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่จะเกิดใน Figure 1

Table 3 Projection effect of climate change 2030s 2050s for mean rice production

Projection climate change	Mean Fn.		Variance Fn.	
	2030s	2050s	2030s	2050s
Effect of temp. (SSP1.19: 50th)	-1.797	-1.884	-0.509	-0.534
Effect of temp. (SSP2.45: 50th)	-1.856	-2.547	-0.526	-0.721
Effect of temp. (SSP8.85: 50th)	-1.954	-3.105	-0.553	-0.879
Effect of precipitation (SSP1.19: 50th)	0.119	0.284	-0.004	-0.010
Effect of precipitation (SSP2.45: 50th)	0.538	0.627	-0.019	2.201
Effect of precipitation (SSP8.85: 50th)	0.540	0.615	-0.019	-4.165
Effect of temperature (%)	-1.869	-2.512	-0.529	-0.711
Effect of precipitation (%)	0.399	0.509	-0.014	-0.658
Summarize the effect of climate change	-1.470	-2.003	-0.543	-1.369



Source: Result Analysis

Figure 1 Projection effect and risk of climate change on rice production in northeastern Thailand in 2030 - 2059

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการคาดการณ์ผลกระทบและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวนาปีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ใช้รูปแบบความสัมพันธ์แบบ Cobb-Douglas ค่าสัมประสิทธิ์จากการประมาณค่าจึงเป็นค่าความยืดหยุ่น (elasticity) ของปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตข้าวนาปี และวิเคราะห์แบบข้อมูลพาเนลเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่เอนเอียงและมีประสิทธิภาพได้แก้ไขปัญหาความแปรปรวนของค่าความความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดแบบทั่วไปที่เป็นไปได้ (FGLS) สำหรับการประมาณค่าฟังก์ชัน

ความแปรปรวน จัดรูปแบบสมการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดแบบพาเนล (PLS)

ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ปลูกข้าว แนวโน้มของเวลา และปริมาณน้ำฝนสะสมเฉลี่ยในฤดูการผลิตมีผลกระทบเชิงบวกต่อผลผลิตข้าวนาปี และเป็นตัวแปรลดความเสี่ยงจากความแปรปรวนต่อการผลิตข้าวนาปีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกันตัวแปรอุณหภูมิเฉลี่ย และความแปรปรวนอุณหภูมิเฉลี่ยมีผลกระทบเชิงลบต่อผลผลิตข้าวนาปีและเป็นตัวแปรเพิ่มความเสี่ยงจากความแปรปรวนต่อการผลิตข้าวนาปี

ผลจำลองเชิงตัวเลขเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงในอนาคตของการผลิตข้าวภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเส้นทางการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมแบบร่วมแบ่งปัน ในช่วงทศวรรษที่ 2030 และ 2050 พบว่า ผลผลิตเฉลี่ยลดลงร้อยละ 1.470 - 2.003 ก่อให้เกิดความเสียหายจากผลผลิตลดลง 8,049.72 ตัน คิดเป็นมูลค่า 74.41 ล้านบาท และ 10,973.34 คิดเป็นมูลค่า 101.44 ล้านบาท โดยเป็นผลจากอิทธิพลอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นหลัก ในขณะที่ความเสี่ยงจาก ความแปรปรวนผลผลิตเฉลี่ยลดลงร้อยละ 0.509 - 0.879 ความเสี่ยงผลผลิตเฉลี่ยลดลง 2,976.25 ตัน คิดเป็นมูลค่า 27.51 ล้านบาท และความเสี่ยงผลผลิตเฉลี่ยลดลง 7,500.17 ตัน คิดเป็นมูลค่า 69.33 ล้านบาท

การศึกษาครั้งนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาในการตีความผลการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงนโยบาย ดังนี้ ประการแรก การคาดการณ์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอาจจำกัดเฉพาะภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เนื่องจากการศึกษานี้มุ่งเน้นเฉพาะสภาพท้องถิ่นและปัจจัยทางเศรษฐกิจและสังคมในภูมิภาคนี้ ประการที่สอง วิธี FGLS อาจไม่สามารถจับภาพความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรสภาพภูมิอากาศและการผลิตข้าวได้ทั้งหมด เนื่องจากขึ้นอยู่กับสถานการณ์และสมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉพาะ ซึ่งอาจมองข้ามการเปลี่ยนแปลงในความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและพลวัตของนโยบาย ประการที่สาม การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับผลกระทบในอนาคตนั้นเรียบง่ายเกินไปอาจไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสถานการณ์ในโลกแห่งความเป็นจริง เนื่องจากเป็นเพียงการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตเท่านั้น

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะจากการศึกษาดังนี้ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง หรือเกษตรกรควรตระหนักถึงผลกระทบและความเสี่ยงต่อผลผลิตข้าว ในปัจจุบันมีแหล่งข้อมูลสภาพอากาศที่เกษตรกรสามารถเข้าถึงได้และมีความแม่นยำ เกษตรกรสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวในการวางแผนการผลิต รวมถึงการวิธีการรับมือปรับตัวกับปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับผลผลิตในอนาคตได้ เช่น การมีแหล่งน้ำสำรองที่เพียงในพื้นที่ของตนเอง การใช้เทคโนโลยีควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือน เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ “ทุนนักศึกษาเรียนดี” ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้จัดสรรทุนให้กับนักศึกษาให้ได้มีโอกาสเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา อันนำไปสู่การต่อยอดองค์ความรู้ เพื่อสร้างสรรค์งานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อสาธารณะ

เอกสารอ้างอิง

Antle, J. M. 1983. Testing the Stochastic Structure of Production: A Flexible Moment-Based Approach. Journal of Business & Economic Statistics 1(3): 192-201. Available: https://doi.org/10.1080/07350015.1983.10509339.

Antle, J. M. and A. Havenner. 1983. Formulating and Estimating Dynamic Stochastic Production Models. UC Davis ARE Working Papers. Available: https://doi.org/10.22004/ag.econ.225711.

Baethgen, W., J. Hansen, A. Ines, J. Jones, H. Meinke and P. Steduto. 2008. Contributions of Agricultural Systems Modeling to Weather Index Insurance. Article.

Battese, G. E., A. N. Rambaldi and G. H. Wan. 1997. A Stochastic Frontier Production Function with Flexible Risk Properties. Journal of Productivity Analysis 8(3): 269-280. Available: https://doi.org/10.1023/A:1007755604744.

Boogaard, H., J. Schubert, A. De Wit, J. Lazebnik, R. Hutjes and G. Van der Grijn. 2020. Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Available: https://doi.org/10.24381/cds.6c68c9bb. (June 21, 2023)

Jatuporn, C. and K. Takeuchi. 2022. Assessing the impact of climate change on the agricultural economy in Thailand: an empirical study using panel data analysis. Environmental Science and Pollution Research 30(1): 8123-8132. Available: https://doi.org/10.1007/s11356-022-22743-0.

Just, R. E. and R. D. Pope. 1978. Stochastic specification of production functions and economic implications. Journal of Econometrics 7(1): 67-86. Available: https://doi.org/10.1016/0304-4076(78)90006-4.

Just, R. E. and R. D. Pope. 1979. Production function estimation and related risk considerations. American Journal of Agricultural Economics 61(2): 276-284. Available: https://doi.org/10.2307/1239732.

Komarek, A. M., A. De Pinto and V. H. Smith. 2020. A review of types of risks in agriculture: What we know and what we need to know. Agricultural Systems 178(1): 102738. Available: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102738.

NOAA National Centers for Environmental Information. 2023. Climate at a Glance: Global Time Series. Available: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series (January 24, 2023).

Pakeechai, K., N. Sinnarong, K. Autchariyapanitkul and P. Supapunt. 2020. The impacts of climate change factors on rice production and climate-smart agriculture in the Watershed areas of central Thailand. RMUTSB Academic Journal (Humanities and Social Sciences) 5(2): 196-218. [in Thai]

Puphoung, S., N. Sinnarong, K. Autchariyapanitkul and K. Satienpirakul. 2019. Impacts of climate change on rice yield in the north region. Graduate School Journal CRRU 12(2): 119-132. [in Thai]

Sinnarong, N. 2023. Economics of climate change. Faculty of Economics. Maejo University, Chiang Mai. [in Thai]

Sinnarong, N., C. C. Chen, B. McCarl and B. L. Tran. 2019. Estimating the potential effects of climate change on rice production in Thailand. Paddy and Water Environment 17(1): 1-9. Available: https://doi.org/10.1007/s10333-019-00755-w.

Sinnarong, N., S. Kuson, W. Nunthasen, S. Puphoung and V. Souvannasouk. 2022. The potential risks of climate change and weather index insurance scheme for Thailand's economic crop production. Environmental Challenges 8(1): 100575. Available: https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100575.

World Bank. 2022. Climate Change Knowledge Portal. Available: https://climateknowledgeportal.worldbank.org (April 21, 2023)

Yu, Y., J. S. Clark, Q. Tian and F. Yan. 2022. Rice yield response to climate and price policy in high-latitude regions of China. Food Security 14(5): 1143-1157. Available: https://doi.org/10.1007/s12571-021-01253-w.