

การประเมินความสามารถในการปรับตัวของโคนมลูกผสมในประเทศไทยจากความแปรปรวนของผลผลิตน้ำนม: แนวทางการคัดเลือกพันธุ์และการจัดการในสภาพเขตร้อน

Assessing resilience in Thai multibreed dairy cattle based on milk yield variability: Strategies for breeding and management in tropical environments

รัชพล พลสงฆ์¹, ดนัย จัตวา^{1*}, พีรยุทธ นิลชื่น¹, แพรว เทียงพิมล², จุฬานีย์ น่วมจิตร³, ธนาทิพย์ สุวรรณโสภี¹ และ ศกร คุณวุฒิตถิธรณ์¹

Ratchaphon Phonsong¹, Danai Jattawa^{1*}, Peerayut Nilchuen¹, Praew Thiengpimol², Julanee Nuamchit³, Thanathip Suwanasopee¹ and Skorn Koonawootrittriron¹

¹ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

¹ Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

² สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12120

² Department of Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani 12120

³ องค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย มวกเหล็ก สระบุรี 18180

³ Dairy Farming Promotion Organization of Thailand, Muaklek, Saraburi 18180

บทคัดย่อ: ภาวะโลกร้อนและความผันแปรของสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตโคนม โดยเฉพาะในเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย ซึ่งมีความท้าทายด้านความเครียดจากสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความสามารถในการปรับตัว (resilience) ของโคนมลูกผสมในประเทศไทย โดยใช้ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวน (natural logarithm of the variance; LnVar) ของค่าคลาดเคลื่อนจากเส้นโค้งการให้น้ำนมรายตัวเป็นดัชนีชี้วัด ซึ่งอิงจากข้อมูลปริมาณน้ำนมรายวันแบบรายเดือน จำนวน 122,305 ข้อมูล จากโคนม 12,030 ตัว ที่คลอดลูกระหว่างปี พ.ศ. 2540–2566 วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป โดยมีปัจจัยคงที่ ได้แก่ ฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด ระดับสายเลือดโฮลสไตน์ และอายุคลอดลูกครั้งแรก ผลการวิเคราะห์พบว่า ฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอดส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการปรับตัว ($P < 0.0001$) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ($P < 0.0001$) ขณะที่ระดับสายเลือดโฮลสไตน์ ($P = 0.05$) และอายุคลอดลูกครั้งแรก ($P = 0.40$) ไม่มีผลอย่างชัดเจน ค่าเฉลี่ย LnVar อยู่ที่ -0.88 ± 1.37 ซึ่งเทียบเท่ากับคะแนนความสามารถในการปรับตัว $28.90 \pm 15.46\%$ ผลการศึกษาชี้ว่า ความสามารถในการปรับตัวของโคนมได้รับอิทธิพลจากปัจจัยเฉพาะตัวของสัตว์และการจัดการฟาร์ม มากกว่าระดับสายเลือดเพียงอย่างเดียว แม้มีข้อจำกัดจากความถี่ของข้อมูลแบบรายเดือน แต่ดัชนี LnVar มีศักยภาพสูงในการเป็นเครื่องมือเชิงปริมาณสำหรับใช้ในระบบการคัดเลือกพันธุ์ เพื่อส่งเสริมการพัฒนาโคนมที่มีความทนทานต่อความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อม และสนับสนุนความยั่งยืนของอุตสาหกรรมโคนมในเขตร้อนชื้นอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ตัวชี้วัดความสามารถในการปรับตัว; ความแปรปรวนของน้ำนม; ความเครียดจากสิ่งแวดล้อม; การคัดเลือกพันธุ์; โคนม

ABSTRACT: Global warming and increasing climate variability have significantly impacted dairy production systems, particularly in tropical regions such as Thailand, where environmental stress continues to pose ongoing challenges.

* Corresponding author: fagrdsnj@ku.ac.th

Received: date; July 25, 2025 Revised date; February 19, 2026

Accepted: date; February 23, 2026 Published: date; June 24, 2026

This study aimed to assess the resilience of Thai multibreed dairy cattle by using the natural logarithm of the variance (LnVar) of residuals from individual lactation curves as a measure of resilience. The analysis was based on 122,305 monthly test-day milk yield records from 12,030 first-lactation cows calved between 1997 and 2023. A general linear model was applied, with fixed effects including herd-year-season of calving, Holstein fraction, and age at first calving. The results revealed that herd-year-season of calving significantly affected the resilience indicator ($P < 0.0001$), with a positive trend over time ($P < 0.0001$). In contrast, Holstein fraction ($P = 0.05$) and age at first calving ($P = 0.40$) showed no clear effects. The average LnVar was -0.88 ± 1.37 , corresponding to a resilience score of $28.90 \pm 15.46\%$. The findings indicate that dairy cow resilience is more influenced by individual animal characteristics and farm management practices than by breed composition alone. Although the use of monthly test-day data has limitations in capturing daily variability, the LnVar indicator demonstrated strong potential as a quantitative tool for genetic selection programs. Incorporating resilience into breeding objectives could enhance the development of dairy cattle that are more adaptable to environmental fluctuations, thereby supporting the long-term sustainability of dairy production systems in tropical climates.

Keywords: resilience indicator; milk yield variability; environmental stress; genetic selection; dairy cattle

บทนำ

ภาวะโลกร้อนที่ทวีความรุนแรงขึ้นในระดับโลก คาดว่าจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นถึง $1.1\text{--}6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายในปี พ.ศ. 2643 ซึ่งส่งผลให้เกิดคลื่นความร้อน ความผันผวนของสภาพอากาศ และความถี่ของเหตุการณ์สุดขีดเพิ่มมากขึ้น (FAO, 2020) ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตโคนม โดยเฉพาะในเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย ซึ่งโคนมมีความเสี่ยงสูงต่อความเครียดจากความร้อน ความชื้นสะสม และโรค ส่งผลให้ผลผลิตน้ำนมลดลงเฉลี่ยประมาณ 1.34 กก./วัน (จาก 19.66 เหลือ 18.32 กก.; Thammahakin et al., 2024) ภายใต้ระดับความเครียดปานกลาง นอกจากนี้ ความเครียดจากความร้อนยังทำให้อัตราการผสมติดลดลงเหลือเพียง 15% เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงที่มีความเครียดต่ำซึ่งมีอัตราสูงถึง 42% (Thammahakin et al., 2024) สะท้อนถึงผลกระทบต่อสุขภาพและสมรรถภาพการสืบพันธุ์ที่ลดลง (Boonkum et al., 2024; Bhat and Infascelli, 2025) ดังนั้น ความสามารถในการปรับตัวของโคนม (resilience) ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงจึงกลายเป็นลักษณะที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความมั่นคงและความยั่งยืนของอุตสาหกรรมโคนมในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางเศรษฐศาสตร์ ความสามารถในการปรับตัวส่งผลโดยตรงต่อความยั่งยืนของกำไรฟาร์ม เนื่องจากการมีโคนมที่ปรับตัวได้ดีจะช่วยลดต้นทุนแฝงที่สำคัญ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษา ค่าแรงงานที่ใช้ดูแลโคป่วย และค่าเสียโอกาสจากการคัดทิ้งก่อนกำหนด เป็นต้น ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มเสถียรภาพทางรายได้ให้แก่เกษตรกร (Oloo et al., 2023)

โดยหลักการแล้ว ความสามารถในการปรับตัว หมายถึง ความสามารถของสัตว์ในการรักษาหรือฟื้นตัวจากการสูญเสียประสิทธิภาพการผลิตเมื่อเผชิญกับปัจจัยกดดันจากสิ่งแวดล้อม เช่น ความร้อน โรค และการเปลี่ยนแปลงของการจัดการ (Colditz and Hine, 2016) ปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาแนวทางเชิงปริมาณเพื่อประเมินลักษณะดังกล่าวในเชิงพันธุศาสตร์ โดยเฉพาะในบริบทของโคนมในสภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนสูง (Berghof et al., 2019) แนวคิดสำคัญประการหนึ่งของ Scheffer et al. (2018) ที่เสนอว่าสัตว์มักเผชิญกับปัจจัยรบกวนที่ไม่ทราบสาเหตุอยู่ตลอดเวลา ซึ่งปัจจัยดังกล่าวก่อให้เกิดความผันผวนของลักษณะที่สามารถวัดได้ในระดับรายตัว โดยสัตว์ที่แสดงความผันผวนของลักษณะเหล่านี้ในระดับต่ำย่อมสะท้อนถึงการได้รับผลกระทบจากสิ่งรบกวนน้อยกว่า ดังนั้น รูปแบบและระดับของความผันผวนจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้เชิงปริมาณของความสามารถในการปรับตัวได้ ภายใต้กรอบแนวคิดนี้ ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวน (natural logarithm of variance; LnVar) ที่ได้จากเส้นโค้งการให้น้ำนมถูกใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญ โดยโคนมที่มีค่า LnVar ต่ำแสดงถึงความผันผวนของผลผลิตที่ต่ำ สะท้อนถึงความสม่ำเสมอของการผลิตและความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมได้ดี (Poppe et al., 2020) ซึ่งค่าดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมกับลักษณะสำคัญอื่น ๆ เช่น สุขภาพเต้านม ความสามารถในการสืบพันธุ์ อายุการใช้งาน และการกินได้วัตถุแห้ง เป็นต้น (Keßler et al., 2024; Kašná et al., 2025)

แม้ดัชนี LnVar จะได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศเขตภูมิอากาศอบอุ่น เช่น สหรัฐอเมริกา เนเธอร์แลนด์ และเยอรมนี (Bonekamp et al., 2022; Poppe et al., 2022; Keßler et al., 2025) แต่การศึกษาที่เกี่ยวข้องในบริบทของประเทศเขตร้อนชื้นโดยเฉพาะในประเทศไทยยังมีอยู่อย่างจำกัด ทั้งนี้ ประเทศไทยมีลักษณะประชากรโคนมที่แตกต่างอย่างชัดเจนจากประเทศ

ตะวันตก โดยส่วนใหญ่เป็นโคนมลูกผสมระหว่าง *Bos taurus* (เช่น โฮลสไตน์) และ *Bos indicus* ซึ่งมีความหลากหลายทางพันธุกรรมสูง และมีระบบการจัดการฟาร์มที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างภูมิภาค นอกจากนี้ การบันทึกข้อมูลการผลิตในประเทศไทยยังอาศัยข้อมูลรายเดือน (monthly test-day records) แทนข้อมูลรายวัน ซึ่งอาจมีผลต่อความแม่นยำของการประเมินค่าความแปรปรวนในระดับรายตัว (Berghof et al., 2019)

จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงพบว่ยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบในประเทศไทยที่ใช้ดัชนี LnVar เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการปรับตัวของโคนมลูกผสมภายใต้สภาพแวดล้อมแบบร้อนชื้น โดยอิงจากข้อมูลในระบบฟาร์มจริง และยังไม่มีการประเมินผลของปัจจัยด้านพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อมที่หลากหลายต่อค่าดัชนีดังกล่าว ส่งผลให้ยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์คัดเลือกพันธุ์หรือจัดการฟาร์มอย่างมีประสิทธิภาพได้ในทางปฏิบัติ

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ประเมินค่าความสามารถในการปรับตัวของโคนมในประเทศไทย โดยใช้ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนจากเส้นโค้งการให้น้ำนม (LnVar) ที่คำนวณจากข้อมูลน้ำนมแบบรายเดือน (2) วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของดัชนีดังกล่าวตามช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2540–2566 และ (3) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยพันธุกรรม (เช่น ระดับสายเลือดโฮลสไตน์) และการจัดการ (เช่น ฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด และอายุคลอดลูกครั้งแรก) ต่อค่าความสามารถในการปรับตัว เพื่อเสนอแนวทางการนำดัชนีนี้ไปใช้สนับสนุนการคัดเลือกพันธุ์โคนมที่มีความทนทานต่อความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมความยั่งยืนของอุตสาหกรรมโคนมในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการศึกษา

ข้อมูลและการจัดเตรียมข้อมูล

การศึกษานี้ประเมินความสามารถในการปรับตัวของโคนม โดยใช้ระดับความแปรปรวนของผลผลิตน้ำนมรายวันที่เบี่ยงเบนจากค่าคาดหวังตามเส้นโค้งการให้น้ำนม (lactation curve) เป็นดัชนีชี้วัด (resilience indicator) โดยมีสมมติฐานว่า แม่โคนมที่สามารถรักษาระดับผลผลิตให้ใกล้เคียงกับค่าคาดหวังได้ แม้เผชิญกับปัจจัยรบกวน เช่น ความร้อน โรค หรือการเปลี่ยนแปลงด้านโภชนาการ ย่อมสะท้อนถึงความสามารถในการปรับตัวที่ดี ค่า log-transformed variance (LnVar) ของค่าเบี่ยงเบนดังกล่าว จึงสามารถใช้แสดงระดับความแปรปรวนหรือความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่แน่นอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Poppe et al., 2020)

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นข้อมูลผลผลิตน้ำนมรายวันที่สุ่มเก็บเดือนละครั้ง (monthly test-day records) จำนวนรวมทั้งสิ้น 122,305 ข้อมูล จากแม่โคท้องแรก จำนวน 12,030 ตัว (จำนวนข้อมูลการให้น้ำนมเฉลี่ย 10 ครั้ง/ตัว) ที่คลอดระหว่างปี พ.ศ. 2540–2566 ข้อมูลทั้งหมดถูกรวบรวมจากเกษตรกรจำนวน 1,254 ฟาร์ม ซึ่งเป็นเกษตรกรภายใต้โครงการส่งเสริมขององค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย (อ.ส.ค.) และได้รับอนุญาตให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการ ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากกระบวนการผลิตจริงภายในฟาร์มของเกษตรกร ดังนั้น วันและเวลาที่จัดเก็บข้อมูลอาจแตกต่างกันระหว่างฟาร์ม ขึ้นอยู่กับความพร้อมและการจัดการของแต่ละฟาร์ม อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปการเก็บข้อมูลในแต่ละครั้งมีระยะห่างประมาณ 28–35 วัน ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย หมายเลขประจำตัวสัตว์ ฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด ระดับสายเลือดโฮลสไตน์ อายุคลอดลูกครั้งแรก (เดือน) และข้อมูลปริมาณน้ำนมรายวันที่บันทึกแบบรายเดือน

โคนมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของประชากรโคนมหลากหลายพันธุ์ของประเทศไทย (Thai multibreed dairy cattle) ซึ่งพัฒนาขึ้นจากการผสมข้ามพันธุ์และการยกกระดับสายเลือดโคนมระหว่างโคกลุ่ม *Bos indicus* ได้แก่ โคพันธุ์บราห์มัน ชาฮิวาล เรดซินดี และโคพื้นเมืองไทย กับโคกลุ่ม *Bos taurus* ได้แก่ โคพันธุ์โฮลสไตน์ เจอร์ซีย์ บราวน์สวิส และเรดเดน โดยทั้งโคพันธุ์แท้และลูกผสมถูกใช้เป็นพ่อและแม่พันธุ์ในการสร้างประชากรรุ่นถัดมา ส่งผลให้เกิดโคนมที่มีโครงสร้างเป็นประชากรหลากหลายพันธุ์ (Koonawootrittriron et al., 2009) โคนมในชุดข้อมูลมีองค์ประกอบของพันธุ์โคนมเฉลี่ย 3 พันธุ์ (ต่ำสุด 1 และสูงสุด 8 พันธุ์) โดยมีพันธุ์โฮลสไตน์เป็นพันธุ์หลัก ทั้งนี้ แม่โคนมมีระดับสายเลือดโฮลสไตน์ เฉลี่ย $88.49 \pm 10.46\%$ (ต่ำสุด = 0% และสูงสุด = 100%) โดย 88% ของแม่โคนมมีสัดส่วนสายเลือดโฮลสไตน์ตั้งแต่ 75% ขึ้นไป ขณะที่พ่อพันธุ์และแม่พันธุ์มีสัดส่วนสายเลือดโฮลสไตน์ในระดับดังกล่าวคิดเป็น 94% และ 73% ตามลำดับ นอกจากนี้ แม่โคนมมีอายุเมื่อคลอดลูกครั้งแรกเฉลี่ย 30.63 ± 6.09 เดือน ขณะที่ปัจจัยด้าน

การจัดการถูกกำหนดในรูปแบบกลุ่มฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด (herd-year-season; HYS) ซึ่งประกอบด้วยทั้งหมด 5,913 กลุ่ม สะท้อนความแปรผันของสภาพแวดล้อมและการจัดการฟาร์มตลอดช่วงเวลาการศึกษา

ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูล ได้ดำเนินการตรวจสอบความครบถ้วน (data completeness) และระบุค่าผิดปกติ (outliers) ทั้งในด้านการระบุตัวสัตว์ การจัดการฟาร์ม และผลผลิตน้ำนม โดยเฉพาะข้อมูลน้ำนมที่อยู่นอกช่วงปริมาณการให้น้ำนม ซึ่งคิดเป็นจำนวนแม่โคที่ถูกคัดทิ้ง 9 ตัว จากทั้งหมด 12,039 ตัว (คิดเป็น 0.07%) คงเหลือแม่โคที่นำไปวิเคราะห์ทั้งสิ้น 12,030 ตัว ได้รับการพิจารณาและตัดออกจากชุดข้อมูลหลัก พร้อมกันนี้ ได้ปรับโครงสร้างข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์เชิงสถิติ เช่น การจัดให้ข้อมูลอยู่ในลักษณะ panel data และเชื่อมโยงข้อมูลแต่ละตัวแปรเข้ากับรหัสประจำตัวสัตว์และช่วงเวลาการบันทึก

การประมาณเส้นโค้งการให้น้ำนมของโคนมแต่ละตัว

เนื่องจากข้อมูลผลผลิตน้ำนมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นข้อมูลรายเดือน การประมาณเส้นโค้งการให้น้ำนมรายตัวจึงดำเนินการโดยใช้สมการถดถอยพหุนาม (polynomial regression) ซึ่งมีรายงานว่าสามารถอธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตน้ำนมตลอดระยะให้นมได้อย่างเหมาะสม (Koonawootrittriron et al., 2001; Poppe et al., 2020) ทั้งนี้ ได้ดำเนินการวิเคราะห์เบื้องต้น (preliminary analysis) โดยทดสอบสมการพหุนามลำดับที่ 2 ถึง 4 กับชุดข้อมูลเดียวกัน และประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองจากค่า mean square error (MSE) เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือก ผลการวิเคราะห์พบว่าสมการพหุนามลำดับที่ 4 ให้ค่า MSE ต่ำที่สุด (0.0996) เมื่อเทียบกับสมการพหุนามลำดับที่ 3 (0.1586) และลำดับที่ 2 (0.3531) สะท้อนถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล จึงถูกเลือกใช้ในการประมาณเส้นโค้งการให้น้ำนมรายตัวในการศึกษานี้ โดยสมการที่ใช้มีรูปแบบดังนี้

$$MY_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \epsilon$$

โดยที่ MY_t คือ ปริมาณน้ำนมที่สังเกตได้ในวันที่ t β_0 คือ ค่าคงที่ของสมการซึ่งกำหนดระดับฐานของเส้นโค้งการให้น้ำนม (ปริมาณน้ำนมเริ่มต้น) β_1 β_2 β_3 และ β_4 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปร t ที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำนมในลำดับต่าง ๆ ของเวลา และ ϵ คือ ความคลาดเคลื่อน [$\epsilon \sim NID(0, \sigma_\epsilon^2)$] การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการดำเนินการโดยใช้คำสั่ง PROC REG ในโปรแกรม SAS (SAS, 2014)

การคำนวณค่าตัวชี้วัดความสามารถในการปรับตัว

ค่าความสามารถในการปรับตัวของโคนม (resilience indicator) คำนวณจากค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนระหว่างปริมาณน้ำนมรายวันที่บันทึกค่าได้จริงกับค่าคาดหวังจากเส้นโค้งการให้นมในแต่ละตัว จากนั้นค่าดังกล่าวถูกแปลงด้วยลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวน (natural logarithm of variance; LnVar) เพื่อให้การแจกแจงของข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงปกติ ตามแนวทางที่เสนอโดย Poppe et al. (2020) จากนั้น เพื่อความสะดวกในการตีความและการเปรียบเทียบในระดับประชากร ค่าดัชนี LnVar จึงถูกแปลงให้อยู่ในรูป คะแนนการปรับตัว (resilience score; %) โดยใช้กระบวนการ Min-Max normalization ให้อยู่ในช่วง 0-100% การแปลงข้อมูลดังกล่าว มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับการนำเสนอผลให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายและสอดคล้องกับการใช้งานเชิงปฏิบัติ โดยเปลี่ยนจากค่า LnVar ซึ่งมีค่าเป็นลบและขอบเขตไม่ตายตัว (ค่าต่ำหมายถึงความสามารถในการปรับตัวดี) ไปเป็นคะแนนมาตรฐานที่มีขอบเขตชัดเจน (0-100%) และตีความได้ตรงไปตรงมา (ค่าสูงหมายถึงความสามารถในการปรับตัวดี) ทั้งนี้ การแปลงดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างการแจกแจงหรือความสัมพันธ์เชิงสัมพันธ์ของข้อมูลเดิม แต่เป็นการปรับสเกลเพื่อการนำเสนอผลและการสื่อสารเชิงปฏิบัติเท่านั้น โดยสมการที่ใช้มีรูปแบบดังนี้

$$\text{Resilience score (RS; \%)} = \left(1 - \frac{\text{LnVar}_i - \min(\text{LnVar})}{\max(\text{LnVar}) - \min(\text{LnVar})} \right) \times 100$$

โดยที่ RS คือ ค่าคะแนนความสามารถในการปรับตัวในรูปแบบร้อยละ LnVar คือ ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนจากเส้นโค้งการให้น้ำนมรายตัวของโคตัวที่ i $\min(\text{LnVar})$ คือ ค่าต่ำสุดของ LnVar ในกลุ่มประชากรทั้งหมดที่ศึกษา และ $\max(\text{LnVar})$ คือ ค่าสูงสุดของ LnVar ในกลุ่มประชากรทั้งหมดที่ศึกษา ทั้งนี้ การแปลง LnVar เป็น RS มีข้อดีคือช่วยให้สามารถเปรียบเทียบระหว่างตัวสัตว์และระหว่างช่วงเวลาได้ง่าย และสามารถใช้เป็นตัวแปรประกอบการคัดเลือกพันธุ์ (breeding program) ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลความสามารถในการปรับตัวของโคนม (LnVar และ RS) ทั้งหมดถูกตรวจสอบความครบถ้วน ความผิดปกติ และจัดเรียงให้อยู่ในรูปแบบฐานข้อมูล จากนั้นวิเคราะห์การแจกแจงของตัวแปรด้วยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) เพื่อตรวจสอบจำนวนข้อมูล ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่ากลาง ความแปรปรวน และการกระจายตัว

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการปรับตัวดำเนินการด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (general linear model; GLM) โดยใช้คำสั่ง PROC GLM ในโปรแกรม SAS (SAS, 2014) ซึ่งกำหนดฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด ระดับสายเลือดโฮลสไตน์ และอายุคลอดลูกครั้งแรก (เดือน) เป็นปัจจัยคงที่ (fixed effects) และความคลาดเคลื่อนเป็นปัจจัยสุ่ม (random error) ทั้งนี้ ระดับสายเลือดโฮลสไตน์ถูกพิจารณาเป็นตัวแปรร่วม (covariate) ในแบบจำลอง เนื่องจากประชากรโคนมที่ใช้ศึกษาเป็นประชากรโคนมหลากหลายพันธุ์ซึ่งมีโครงสร้างทางพันธุกรรมแบบต่อเนื่อง (admixed population) โดยโคนมแต่ละตัวมีส่วนสายเลือดโฮลสไตน์แตกต่างกันตั้งแต่ระดับต่ำจนถึงสูง การพิจารณาระดับสายเลือดโฮลสไตน์เป็น covariate จึงสามารถสะท้อนความแปรผันของระดับสายเลือดได้อย่างต่อเนื่องและครบถ้วนกว่าการจัดเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม (classified) ซึ่งแบบจำลองมีรูปแบบดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \text{HYS}_i + b_1\text{HF} + b_2\text{AFC} + \epsilon_{ij}$$

เมื่อ	y_{ij}	=	ค่าตัวชี้วัดความสามารถในการปรับตัว
	μ	=	ค่าเฉลี่ยของประชากรสำหรับลักษณะที่ศึกษา
	b_1, b_2	=	สัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับ HF และ AFC ตามลำดับ
	HYS_i	=	ฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด ($i = 1, \dots, 5,913$)
	HF	=	ระดับสายเลือดโฮลสไตน์ (0–100%) พิจารณาเป็นตัวแปรร่วมเชิงต่อเนื่องในรูปแบบการถดถอยเชิงเส้น (covariate)
	AFC	=	อายุคลอดลูกครั้งแรก (12–63 เดือน) พิจารณาเป็นตัวแปรร่วมเชิงต่อเนื่องในรูปแบบการถดถอยเชิงเส้น (covariate)
	ϵ_{ij}	=	ความคลาดเคลื่อน [$\epsilon \sim \text{NID}(0, \sigma_e^2)$]

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการปรับตัวของโคนมตามช่วงเวลา ค่าเฉลี่ยสี่สแควร์ (least squares means) ของ RS ที่ประมาณได้จากตัวแปร HYS ในแบบจำลอง GLM ถูกนำมาจำแนกตามปีที่โคคลอดลูก (calving year) จากนั้น ดำเนินการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression) โดยกำหนดให้ปีที่โคคลอดลูกเป็นตัวแปรอิสระ และใช้ค่าเฉลี่ยสี่สแควร์ของ RS เป็นตัวแปรตาม เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการปรับตัวตลอดช่วงปี พ.ศ. 2540–2566 ด้วย PROC REG ในโปรแกรม SAS (SAS, 2014) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

เมื่อ	y_i	=	ค่าเฉลี่ยสี่สแควร์ของ RS
	X_i	=	ปีที่คลอดลูกของโคตัวที่ i
	β_0	=	ค่าคงที่
	β_1	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย
	ε_i	=	ความคลาดเคลื่อน [$\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma_e^2)$]

ผลการศึกษา

สถิติเชิงพรรณนาและการกระจายตัวสำหรับความสามารถในการปรับตัวของโคนม

การประเมินค่าความสามารถในการปรับตัวของโคนมไทยโดยใช้ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนจากเส้นโค้งการให้น้ำนมรายตัว (LnVar) จากโคนมจำนวน 12,030 ตัว พบว่า ค่าเฉลี่ย LnVar อยู่ที่ -0.88 ± 1.37 โดยมีค่าต่ำสุด -7.13 และค่าสูงสุด 1.41 (Table 1) ช่วงการกระจายของค่า LnVar สะท้อนถึงความแตกต่างระหว่างตัวสัตว์ในการรักษาความสม่ำเสมอของการให้น้ำนมภายในประชากรโคนมที่ศึกษา ค่าเฉลี่ยและการกระจายตัวของค่า LnVar อยู่ในช่วงที่แตกต่างจากรายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ดำเนินการในประชากรโคนมภายใต้บริบทของพันธุ์ ระบบการเลี้ยง และสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน เช่น ประชากรโคนมพันธุ์แท้โฮลสไตน์ในสาธารณรัฐเช็ก (1.88 ± 0.74 ; Kašná et al., 2025) และในประเทศเนเธอร์แลนด์ (0.99 ± 0.59 ; Poppe et al., 2020) รวมถึงประชากรโคนมพันธุ์ชาฮิวาลในประเทศอินเดีย (0.72 ± 0.64 ; Priyadharshini et al., 2025) และประชากรโคนมโฮลสไตน์ลูกผสมในประเทศเคนยา (0.46 ± 0.69 ; Oloo et al., 2023) ความแตกต่างดังกล่าวอาจสะท้อนถึงลักษณะเฉพาะของประชากรโคนมลูกผสมในประเทศไทย ซึ่งพัฒนาขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนและความเครียดจากอากาศร้อนอย่างต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดระหว่างประชากรต่างประเทศและไทยควรพิจารณาควบคู่กับวิธีการบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะความถี่ของข้อมูล (รายวันในต่างประเทศ vs. รายเดือนในไทย) ซึ่งอาจทำให้ความแม่นยำในการประเมินความแปรปรวนของผลผลิตลดลง และทำให้ค่าความแปรปรวนของ residuals ต่ำกว่าความเป็นจริง ข้อจำกัดนี้ควรได้รับการชดเชยหรือควบคุมในการวิเคราะห์ในอนาคต เช่น การใช้แบบจำลอง mixed model ที่รวมข้อมูลจากฟาร์มและลำดับโคภายในฟาร์ม หรือการปรับค่าคลาดเคลื่อนด้วยวิธีจำลองซ้ำ (resampling) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเปรียบเทียบ

Table 1 Descriptive statistics of resilience indicators in Thai multibreed dairy cattle

Variable	Descriptive statistics				
	N	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Natural logarithm of variance (LnVar)	12,030	-0.88	1.37	-7.13	1.41
Resilience score (RS; %)	12,030	28.90	15.46	2.91	99.60

Note: LnVar refers to the natural logarithm of the variance of residuals from individual lactation curves fitted using fourth-order polynomial regression. The RS (resilience score) was calculated by normalizing LnVar values into a percentile scale (0–100), where higher scores indicate greater resilience.

เพื่อให้สามารถตีความค่า LnVar ได้ในเชิงปฏิบัติ การศึกษานี้ได้นำค่า LnVar ไปแปลงให้อยู่ในรูปแบบ “คะแนนความสามารถในการปรับตัว” (RS) ซึ่งอยู่ในช่วง 0–100% โดยการจัดอันดับและ normalization ตามค่าต่ำสุด–สูงสุดในประชากร ผลการคำนวณพบว่า RS มีค่าเฉลี่ย $28.90 \pm 15.46\%$ โดยมีค่าต่ำสุด 2.91% และค่าสูงสุด 99.60% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโคนมส่วนใหญ่ในประชากรยังมี

คะแนนความสามารถในการปรับตัวอยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกันภายในกลุ่ม การที่ค่า RS กระจุกตัวอยู่ในช่วงต่ำกว่า 50% แสดงให้เห็นว่าแม้บางฟาร์มและบางตัวสัตว์จะมีความสามารถในการรักษาความสม่ำเสมอของการให้น้ำนมได้ดี แต่โดยรวมแล้วประชากรโคนมไทยยังมีความแปรปรวนที่แสดงถึงความไวต่อสิ่งแวดล้อมและความเครียดในระดับสูง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Berghof et al. (2019) ที่ระบุว่าความสามารถในการปรับตัวเป็นลักษณะที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยแวดล้อมเป็นหลัก และอาจต้องใช้การคัดเลือกพันธุ์ในระยะยาวร่วมกับการปรับปรุงการจัดการฟาร์มเพื่อให้เกิดผลชัดเจน

แม้ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวน (LnVar) จะสามารถใช้เป็นดัชนีความสามารถในการปรับตัวของโคนมได้ในทางสถิติ แต่การตีความเชิงชีวภาพในระดับประชากรยังคงมีข้อจำกัด เช่น ค่ากลางของประชากรที่อยู่ที่ -0.88 อาจไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าโคนมตัวใดมีระดับความสามารถในการปรับตัวอยู่ในช่วงสูงหรือต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่น ด้วยเหตุนี้ การศึกษาได้ประยุกต์ใช้การแปลงค่า LnVar ให้อยู่ในรูปของคะแนนความสามารถในการปรับตัว (RS) ซึ่งแสดงในสเกล 0–100 โดยอิงจากการจัดอันดับภายในประชากร การแปลงดังกล่าวช่วยปรับทิศทางและขอบเขตของค่าดัชนีให้อยู่ในรูปแบบที่ตีความได้ง่ายขึ้น โดยคะแนนที่สูงสะท้อนถึงความสามารถในการปรับตัวที่ดีกว่า ทั้งนี้ RS ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่ LnVar ในเชิงสถิติ แต่ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดเสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการจำแนกสัตว์ การจัดอันดับ และการนำผลไปประยุกต์ใช้ในบริบทของการจัดการฝูงและการคัดเลือกพันธุ์ในระดับประชากร

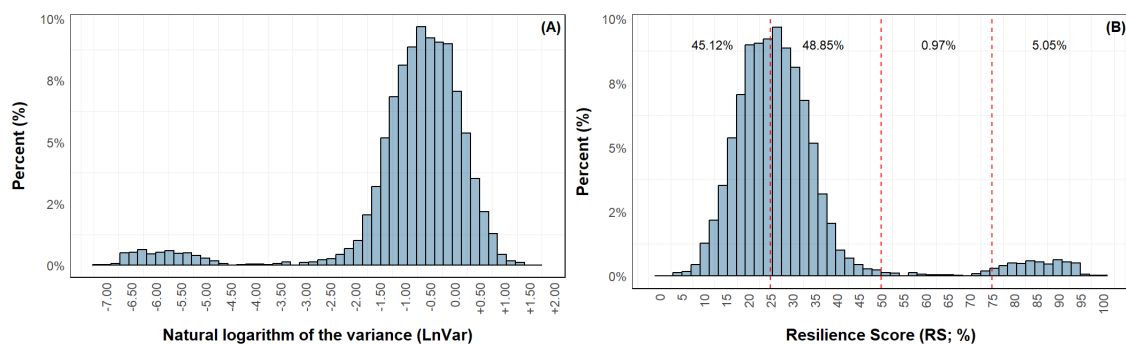


Figure 1 Histogram of resilience indicator distributions in Thai multibreed dairy cattle (n = 12,030). (A) Distribution of the natural logarithm of the variance of residuals from individual lactation curves (LnVar), showing a left-skewed and partially bimodal pattern. (B) Distribution of the normalized resilience score (RS; %), derived from LnVar using percentile-based transformation.

การแจกแจงของค่า LnVar มีลักษณะเบ้ซ้าย (left-skewed distribution) และมีข้อมูลบางกลุ่มที่อยู่ห่างจากค่ากลางอย่างชัดเจน (Figure 1A) ส่งผลให้การแจกแจงของค่าคะแนนความสามารถในการปรับตัว (RS) มีลักษณะกระจุกตัวอยู่ในช่วงค่าต่ำ (Figure 1B) โดยมีค่าเฉลี่ย RS $28.90 \pm 15.46\%$ และพบว่าโคนมส่วนใหญ่ในประชากร (93.97%) มีค่า RS ต่ำกว่า 50% ขณะที่โคนมที่มีค่า RS สูงกว่า 75% มีเพียง 5.05% เท่านั้น สะท้อนให้เห็นถึงสัดส่วนที่ค่อนข้างต่ำของโคนมที่มีความสม่ำเสมอในการให้น้ำนมสูงภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดด้านความสามารถในการตอบสนองและฟื้นตัวของตัวสัตว์ภายใต้ความเครียดเรื้อรังในสภาพแวดล้อมเขตร้อนชื้นที่มีความแปรปรวนของอุณหภูมิและความชื้นสูงตลอดทั้งปี นอกจากนี้ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังอาจสะท้อนผลทางอ้อมจากแนวทางการพัฒนาพันธุ์กรรมโคนมในประเทศไทยที่มุ่งเน้นการคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิตน้ำนมเป็นหลัก ซึ่งมีรายงานความสัมพันธ์เชิงลบกับลักษณะด้านความสามารถในการปรับตัวและความทนทานต่อสภาพแวดล้อม (Fathoni et al., 2025)

นอกจากนี้ รูปแบบการแจกแจงของค่า RS ยังแสดงลักษณะการแจกแจงแบบสองยอด (bimodal distribution) อย่างชัดเจน (Figure 1B) ซึ่งในเชิงการวิเคราะห์ทางสถิติถือเป็นลักษณะที่ควรพิจารณาอย่างระมัดระวัง เนื่องจากอาจสะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของข้อมูลหรือความแตกต่างภายในประชากรที่ยังไม่ได้ถูกอธิบายอย่างครบถ้วน เช่น การมีโครงสร้างย่อยของประชากร (subpopulation) หรืออิทธิพลจากปัจจัยภายนอกที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มสัตว์ (Wolf and Sumner, 2001; Sell-Kubiak et al.,

2022) อีกทั้ง ลักษณะการแจกแจงดังกล่าวอาจได้รับอิทธิพลจากข้อจำกัดของข้อมูลผลผลิตน้ำนมที่บันทึกในระดับรายเดือน (monthly test-day records) ซึ่งอาจไม่เพียงพอในการสะท้อนความแปรปรวนของผลผลิตในระดับรายวันได้อย่างแม่นยำ (Berghof et al., 2019)

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ถือเป็นก้าวสำคัญของการนำแนวคิดการใช้ค่า LnVar และ RS มาประยุกต์ใช้ในการประเมินลักษณะความสามารถในการปรับตัวของโคนมในเขตร้อนขึ้น ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากตัวชี้วัดดังกล่าว ควรมีการพัฒนาและปรับปรุงระบบบันทึกข้อมูลให้มีความถี่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มความถี่ของการเก็บข้อมูล test-day records อย่างเป็นระบบ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความละเอียดในการประเมินลักษณะการปรับตัวของโคนมแต่ละตัว และลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากความถี่ของข้อมูลที่ต่ำ ซึ่งยังเป็นข้อจำกัดในหลายระบบฟาร์มในเขตร้อน ยิ่งไปกว่านั้น การนำตัวชี้วัด LnVar และ RS ไปประยุกต์ใช้ในระบบการคัดเลือกพันธุ์ควรดำเนินการควบคู่ไปกับการศึกษาความสัมพันธ์ทางพันธุกรรม (genetic correlations) ระหว่าง RS กับลักษณะสำคัญอื่น ๆ ได้แก่ สุขภาพเต้านม สมรรถภาพการสืบพันธุ์ และความคงที่ขององค์ประกอบน้ำนม เพื่อรองรับการใช้ RS เป็นองค์ประกอบในดัชนีการคัดเลือกแบบหลายลักษณะ (multi-trait selection index) อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการปรับตัวของโคนม

ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (general linear model; GLM) แสดงให้เห็นว่าฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอด (HYS) มีอิทธิพลต่อค่าคะแนน RS อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.001$) ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ Berghof et al. (2019) ที่ระบุว่าความสามารถในการปรับตัวเป็นผลลัพธ์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม (genotype-by-environment interaction) โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น ความแปรผันของอุณหภูมิ ความชื้น และระบบการจัดการฟาร์มในแต่ละฤดูกาลและพื้นที่อาจส่งผลให้โคแสดงพฤติกรรมการให้น้ำนมที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ในทางกลับกัน ปัจจัยระดับสายเลือดโฮลส์ไตน์ (HF) และอายุคลอดลูกครั้งแรก (AFC) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าคะแนน RS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.05$ และ $P = 0.40$ ตามลำดับ) โดยค่า P-value ของ HF ใกล้เคียงกับขอบเขตของนัยสำคัญ ($P < 0.05$) อาจสะท้อนว่าภายใต้ชุดข้อมูลและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ ยังไม่สามารถตรวจพบอิทธิพลเชิงพันธุกรรมของระดับสายเลือดต่อความสามารถในการปรับตัวได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ ความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของโครงสร้างประชากรโคนมลูกผสมและข้อจำกัดด้านปริมาณและความละเอียดของข้อมูล การศึกษาในอนาคตที่อาศัยข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ครอบคลุมช่วงเวลาในการบันทึกที่ยาวขึ้น หรือมีความถี่ของข้อมูลที่สูงขึ้น อาจช่วยให้สามารถประเมินบทบาทของปัจจัยเชิงพันธุกรรมต่อความสามารถในการปรับตัวได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น สำหรับผลของ AFC ที่ไม่มีนัยสำคัญอาจบ่งชี้ว่า อายุเมื่อเริ่มเข้าระบบผลิตไม่ได้มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการรักษาระดับผลผลิตในช่วงให้นมแรก แม้ว่าปัจจัยนี้จะมีผลสำคัญต่อพฤติกรรมการสืบพันธุ์และสมรรถภาพการใช้งานโดยรวม

อย่างไรก็ดี ควรพิจารณาการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นหรือการจำแนกกลุ่มช่วงอายุ เพื่อประเมินความสัมพันธ์ที่อาจไม่เป็นเส้นตรง รวมถึงการประยุกต์ใช้ข้อมูลจีโนม เช่น การใช้ genomic relationship matrix เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการแยกแยะอิทธิพลของ HF และ AFC ต่อ RS ทั้งนี้ แม้แบบจำลอง GLM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูล RS ซึ่งถูกแปลงให้อยู่ในสเกล 0-100 แล้ว แต่ยังมีข้อจำกัดในการควบคุมโครงสร้างข้อมูลที่มีลักษณะซ้อน (hierarchical data structure) เช่น โคภายในฟาร์มเดียวกันหรือความแตกต่างของระบบจัดการระหว่างฟาร์ม ดังนั้น การวิเคราะห์ในอนาคตควรพิจารณาใช้แบบจำลองเชิงเส้นผสม (linear mixed model) หรือแบบจำลองถดถอยสุ่ม (random regression model) ซึ่งสามารถควบคุมทั้ง fixed effects และ random effects ได้พร้อมกัน และอาจช่วยเปิดเผยอิทธิพลของสายเลือดและอายุเมื่อคลอดลูกที่อาจถูกลบโดยความแปรผันระหว่างฟาร์ม

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการปรับตัวของโคนมตามช่วงเวลา

ค่าความสามารถในการปรับตัวของโคนมในแต่ละปีที่คลอด (calving year) แสดงใน Figure 2 โดยใช้ค่าเฉลี่ยสี่สแควร์ของค่าคะแนน RS ที่ประมาณจากแบบจำลอง GLM เป็นตัวแทน ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายพบว่าแนวโน้มของค่าคะแนน RS เฉลี่ยในประชากรโคนมไทยมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 (ค่าเฉลี่ย $23.12 \pm 3.26\%$) จนถึงปี พ.ศ. 2564 ($50.06 \pm 1.56\%$) โดยมีอัตราการเพิ่มเฉลี่ยปีละ 0.98 หน่วย ($P < 0.0001$)

แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงบวกของความสามารถในการปรับตัวของโคนมในระดับประชากรในช่วงเวลา
กว่า 25 ปี ซึ่งอาจเป็นผลจากการคัดเลือกพันธุ์โดยอ้อมจากสมรรถภาพการให้น้ำนมที่สม่ำเสมอ รวมถึงผลจากการคัดทั้งตามธรรมชาติ
และการจัดการที่กำจัดโคที่มีความสามารถในการปรับตัวต่ำออกจากฝูง ทำให้ประชากรที่คงอยู่มีระดับคะแนน RS เฉลี่ยสูงขึ้น นอกจากนี้
ยังอาจได้รับอิทธิพลจากการพัฒนาด้านโภชนาการ การจัดการฟาร์ม และการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมของโคในระยะยาว ทั้งนี้ ผลลัพธ์
สอดคล้องกับงานของ Bengtsson et al. (2022) ที่ระบุว่า การคัดเลือกพันธุ์โดยอิงจากค่าความแปรปรวนของผลผลิตน้ำนมสามารถช่วย
เพิ่มระดับความสามารถในการปรับตัวของโคนมได้ แม้อาจมีผลข้างเคียงต่อผลผลิตในระยะสั้น แต่สามารถเพิ่มเสถียรภาพและความ
ยั่งยืนของระบบการผลิตในระยะยาวได้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าคะแนน RS รายปีพบว่ามีความแปรปรวนภายในปีในระดับสูง โดยเฉพาะในช่วงปี พ.ศ. 2554–
2560 ซึ่งค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงและมีการกระจายของข้อมูลกว้างขึ้น สะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของระดับความสามารถในการ
ปรับตัวในช่วงเวลาดังกล่าว เหตุการณ์นี้อาจเป็นผลจากความผันแปรของสภาพภูมิอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ข้อมูลจาก
กรมอุตุนิยมวิทยา (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2568) ที่แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่ประเทศไทยมีความแปรปรวนของอุณหภูมิ
(23.5–31.5 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ (57.5–89.8%) ในระดับสูงส่งผลให้โคนมที่ผลิตน้ำนมในช่วงนี้ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่ไม่
เอื้ออำนวย และสะท้อนออกมาในคะแนน RS ที่ลดลงอย่างชัดเจน ข้อค้นพบนี้ยังเน้นย้ำลักษณะเฉพาะของความสามารถในการปรับตัว
ของโคนม ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่แสดงออกภายใต้ผลกระทบร่วมกันของพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม (Bengtsson et al., 2022) โดยเฉพาะ
ในบริบทของฟาร์มในเขตร้อนชื้นของประเทศไทย ซึ่งความแปรปรวนของสภาพอากาศ ทั้งอุณหภูมิและความชื้น รวมถึงความแตกต่าง
ของระบบการจัดการในแต่ละฤดูกาล ส่งผลให้โคนมเกิดความเครียดจากความร้อน และกระตุ้นการทำงานของแกน Hypothalamic-
Pituitary-Adrenal (HPA axis) ทำให้มีการหลั่งฮอร์โมนคอร์ติซอล (cortisol) เพิ่มขึ้น (Priyadharshini et al., 2025) ระดับคอร์ติ
ซอลที่สูงนี้จะไปกระตุ้นกระบวนการสลายสารอาหาร และการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการแบ่งพลังงาน (energy partitioning) โดย
ร่างกายจะลดการส่งกลูโคสไปใช้ในการสร้างน้ำนมเพื่อสำรองพลังงานไว้สำหรับการระบายความร้อนและการดำรงชีพ (Sammad et al.,
2020) ทำให้กระบวนการสังเคราะห์น้ำนมเกิดความไม่สม่ำเสมอ และสะท้อนออกมาในรูปแบบของค่าความแปรปรวนของผลผลิตน้ำนม
(LnVar) ที่สูงขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม แม้ในช่วงปี พ.ศ. 2566–2567 ความแปรปรวนของอุณหภูมิ (24.5–32.7 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ (56.3–
89.3%) ยังคงสูงเช่นเดียวกัน (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2568) แต่กลับพบว่าค่าคะแนน RS เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ควรพิจารณา
ประกอบกับข้อเท็จจริงว่าข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวยังมีจำนวนจำกัด และมีการกระจายของค่า RS ที่กว้าง จึงยังไม่สามารถสรุปแนวโน้ม
ได้อย่างชัดเจน การรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมในอนาคต รวมถึงการส่งเสริมให้เกษตรกรบันทึกข้อมูลผลผลิตน้ำนมรายตัวอย่างต่อเนื่อง จะ
ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินระดับความสามารถในการปรับตัวของโคนมภายใต้บริบทของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศใน
ปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ในภาพรวม แม้แนวโน้มค่าเฉลี่ยคะแนน RS แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปีที่ศึกษา ซึ่งสะท้อนสัญญาณเชิงบวกในระดับประชากร
แต่ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นที่พบมีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด (R^2) เพียง 0.0016 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวน
ของคะแนน RS ในแต่ละปีมีสูง และมีปัจจัยอื่นร่วมที่ไม่ได้ควบคุมในแบบจำลองที่มีผลต่อค่าความสามารถในการปรับตัว เช่น ความ
แตกต่างของระบบการจัดการระหว่างฟาร์ม การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศเฉพาะปี การระบาดของโรคเฉพาะถิ่น หรือภาวะ
เศรษฐกิจที่ส่งผลต่อคุณภาพอาหารสัตว์และการบริหารจัดการโภชนาการในช่วงเวลานั้น ๆ ดังนั้น แม้แนวโน้มภาพรวมของคะแนน RS
จะแสดงสัญญาณเชิงบวกแต่การตีความควรพิจารณาควบคู่กับระดับความไม่แน่นอนของข้อมูลด้วยเช่นกัน การวิเคราะห์เชิงลึกเพิ่มเติม
เช่น การใช้แบบจำลองหลายตัวแปร (multivariate regression) การวิเคราะห์ข้อมูลในระดับฟาร์มหรือภูมิภาค หรือการผนวกรวม
ข้อมูลพันธุกรรมและสภาพภูมิอากาศ จะช่วยให้สามารถระบุสาเหตุที่แท้จริงของความเปลี่ยนแปลง และนำไปสู่การออกแบบกลยุทธ์การ
คัดเลือกและการจัดการที่แม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับการเพิ่มระดับความสามารถในการปรับตัวของโคนมไทยในอนาคต

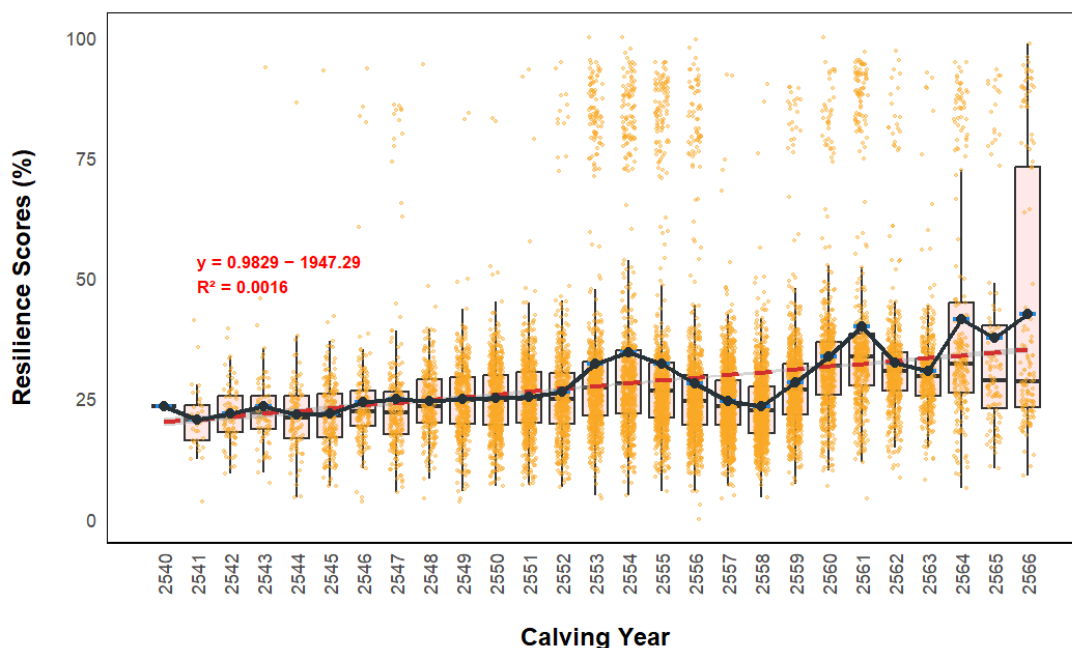


Figure 2 Annual distribution and linear trend of resilience scores (RS; %) in Thai multibreed dairy cattle by calving year (B.E. 2540–2566; corresponding to C.E. 1997–2023). Boxplots represent the distribution of RS for each calving year.

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับสายเลือดโฮลสไตน์กับความสามารถในการปรับตัวของโคนม

ผลการวิเคราะห์ (Figure 3) แสดงให้เห็นว่าแม่โคนมส่วนใหญ่ในประชากรที่ศึกษาจะมีระดับสายเลือดโฮลสไตน์อยู่ในช่วงสูง (75–100%) แต่ค่าคะแนน RS ยังคงกระจายอยู่ทั้งในระดับสูงและต่ำ และไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญระหว่างระดับสายเลือดโฮลสไตน์กับค่า RS ($P > 0.05$) ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการมีสายเลือดโฮลสไตน์ในระดับสูงหรือต่ำไม่ได้รับประกันว่าโคนมจะมีความสามารถในการปรับตัวที่ดีกว่า การพบโคนมที่มีค่า RS สูงในกลุ่ม HF สูงจำนวนมาก ส่วนหนึ่งสะท้อนถึงโครงสร้างของประชากรที่มีสัดส่วนโคนมในช่วงระดับ HF สูงเป็นส่วนใหญ่ ขณะเดียวกัน การปรากฏของโคนมที่มีค่า RS ต่ำภายในช่วงระดับ HF เดียวกัน สนับสนุนแนวคิดว่าความสามารถในการปรับตัวเป็นลักษณะเชิงซับซ้อนและมีความเฉพาะตัวของสัตว์แต่ละตัว ซึ่งได้รับอิทธิพลจากพื้นฐานทางพันธุกรรมรายตัว การตอบสนองต่อความเครียดเฉียบพลัน และความแตกต่างของระบบการจัดการระหว่างฟาร์ม มากกว่าการขึ้นอยู่กับระดับสายเลือดโฮลสไตน์เพียงปัจจัยเดียว ทั้งนี้ สอดคล้องกับข้อเสนอของ Berghof et al. (2019) และ Keßler et al. (2024)

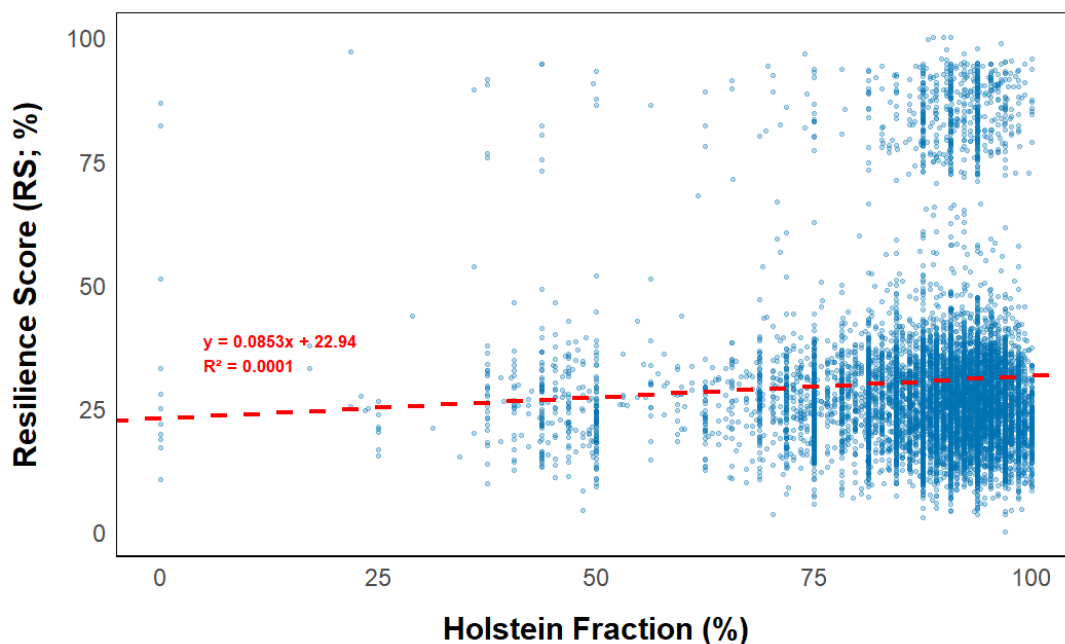


Figure 3 Relationship between Holstein fraction (%) and resilience scores (RS; %) in Thai multibreed dairy cattle. Each dot represents an individual cow.

นอกจากนี้ ยังอาจสะท้อนถึงข้อจำกัดของแนวทางการพัฒนาประชากรโคนมในประเทศไทยในอดีตที่มุ่งเน้นการเพิ่มสัดส่วนสายเลือดโฮลสไตน์เพื่อเพิ่มผลผลิตน้ำนมเป็นหลัก โดยขาดการคัดเลือกพันธุ์ในลักษณะที่สนับสนุนความสามารถในการปรับตัวและสุขภาพของโคนมในสภาพแวดล้อมแบบเขตร้อนชื้น ผลที่ได้คือประชากรโคนมส่วนใหญ่แม้จะมีผลผลิตที่สูงขึ้นในช่วงแรก (Konkruea et al., 2017) แต่ยังคงอ่อนไหวต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อม ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของการให้น้ำนมและความยั่งยืนของการผลิตในระยะยาว (Fathoni et al., 2025)

จากผลการวิเคราะห์นี้ จึงเสนอว่าการคัดเลือกพันธุ์ในอนาคตควรเปลี่ยนจากแนวทางแบบลักษณะเดียว (single-trait selection) ที่เน้นเฉพาะผลผลิตน้ำนม ไปสู่แนวทางการคัดเลือกแบบหลายลักษณะ (multi-trait selection) ซึ่งรวมถึงลักษณะด้านความสามารถในการปรับตัว สุขภาพ ความยืนยาว และความทนร้อน ทั้งนี้ เพื่อพัฒนาประชากรโคนมที่มีความเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยในระยะยาว โดยไม่จำกัดอยู่ที่สัดส่วนสายเลือดเพียงอย่างเดียว แต่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาองค์รวมของพันธุ์กรรมให้ตอบสนองต่อปัจจัยแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความผันแปรของคะแนน RS ที่พบในประชากรยังสะท้อนถึงความแตกต่างของศักยภาพการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมของโคนมแต่ละตัว โดยไม่ได้ขึ้นกับระดับสายเลือดโดยตรง ซึ่งเน้นย้ำถึงบทบาทของปัจจัยทางพันธุกรรมที่ซับซ้อน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสิ่งแวดล้อม (genotype-by-environment interaction) ดังนั้น การระบุลักษณะย่อย (component traits) ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความสม่ำเสมอของการให้น้ำนม (milk yield persistency) ความสมบูรณ์พันธุ์ ความแข็งแรงของเต้านม หรือความแปรปรวนขององค์ประกอบในน้ำนม ซึ่งลักษณะเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมกับดัชนี LnVar หรือ RS และอาจนำมาใช้เป็นเกณฑ์ร่วมในการคัดเลือกพันธุ์ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น (Poppe et al., 2020; Kašná et al., 2025)

แม้ผลการวิเคราะห์ในครั้งนี้จะไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจนระหว่างระดับสายเลือดโฮลสไตน์กับค่าคะแนน RS แต่ข้อมูลที่ได้ถือเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญของการทำความเข้าใจสถานะด้านความสามารถในการปรับตัวของประชากรโคนมในปัจจุบัน โดยเฉพาะในแง่ของการสะท้อนความหลากหลายของการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมภายใต้ระบบฟาร์มแบบเปิดในเขตร้อนชื้นของประเทศไทย ซึ่งลักษณะการแปรผันของ RS นี้ นอกจากจะสามารถใช้ประเมินสถานะด้านความยืดหยุ่นของโคนมรายตัวแล้ว ยังสามารถพัฒนาไปสู่การจัดกลุ่มฟาร์มตามระดับความเสี่ยงด้านความเครียดจากสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปใช้กำหนดแนวทางการจัดการเฉพาะพื้นที่ได้อีกด้วย

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ทางพันธุกรรมที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้น เช่น การประเมินค่าความแปรปรวนทางพันธุกรรม (genetic variance) และอัตราพันธุกรรม (heritability) ของ RS หรือลักษณะที่เกี่ยวข้องโดยตรง จะช่วยยืนยันศักยภาพของดัชนีนี้ในการนำไปใช้ในระบบการคัดเลือกพันธุ์ อีกทั้งการใช้ข้อมูลจาก pedigree หรือ genomic relationship matrix จะช่วยให้สามารถประเมินอิทธิพลของโครงสร้างทางพันธุกรรมที่ซ่อนอยู่ได้แม่นยำยิ่งขึ้น

ในระยะยาว การพัฒนาแบบจำลองการคัดเลือกพันธุ์ที่รวมดัชนี RS เข้ากับลักษณะเชิงเศรษฐกิจอื่น ๆ อย่างรอบด้านจะเป็นกลไกสำคัญในการปรับปรุงพันธุกรรมโคนมให้มีความเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยได้อย่างยั่งยืน โดยเฉพาะภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรงขึ้นในปัจจุบัน การบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่ง ทั้งข้อมูลพันธุกรรมเชิงลึก ได้แก่ พันธุ์ประวัติ (pedigree) ลักษณะปรากฏ (phenotypes) รูปแบบทางพันธุกรรมระดับจีโนม (genotypes) และข้อมูลสิ่งแวดล้อมรายฟาร์ม จะช่วยยกระดับความแม่นยำของการประเมินค่าความสามารถทางพันธุกรรม และส่งเสริมให้เกิดการคัดเลือกพันธุ์ที่ไม่เพียงแต่อาศัยศักยภาพการผลิต แต่ยังคำนึงถึงความสามารถทางพันธุกรรมสำหรับการปรับตัวในสภาพจริงของระบบฟาร์มไทยอย่างแท้จริง

ในภาพรวม ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการปรับตัวของโคนมในประเทศไทยมีความแปรผันตามปีที่คลอดและสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันระหว่างฟาร์ม-ฤดูกาล-การจัดการ แต่ไม่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากระดับสายเลือดโฮลสไตน์เพียงอย่างเดียว จึงเสนอว่า การใช้ดัชนีจาก LnVar หรือ RS ควรนำมาวิเคราะห์ร่วมกับลักษณะอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น องค์ประกอบน้ำนม ความสามารถในการสืบพันธุ์ และสุขภาพ เพื่อพัฒนาแบบจำลองการคัดเลือกพันธุ์แบบหลายลักษณะ (multi-trait selection model) ที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมร้อนขึ้นของประเทศไทย และสามารถเพิ่มเสถียรภาพและความยั่งยืนของระบบการผลิตโคนมภายใต้บริบทของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าโคนมลูกผสมในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังมีความสามารถในการปรับตัวอยู่ในระดับต่ำ แม้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลา โดยมีปัจจัยฟาร์ม-ปี-ฤดูกาลที่คลอດเป็นปัจจัยสำคัญ ขณะที่ระดับสายเลือดโฮลสไตน์และอายุคลอดลูกครั้งแรกไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจน การใช้ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความแปรปรวน (LnVar) และการแปลงเป็น resilience score (RS) สามารถใช้จำแนกความสามารถในการปรับตัวของโคนมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ข้อมูลรายเดือนจะมีข้อจำกัด ค่าดัชนีดังกล่าวมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นเกณฑ์คัดเลือกพันธุ์ เพื่อพัฒนาโคนมที่ทนต่อความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อมในเขตร้อนขึ้นได้ดีขึ้น ควรมีการพัฒนาแบบบันทึกข้อมูลให้ถี่และแม่นยำยิ่งขึ้น และส่งเสริมการใช้ดัชนีนี้ร่วมกับลักษณะอื่นในระบบการคัดเลือกแบบหลายลักษณะ เพื่อสนับสนุนความยั่งยืนของการผลิตโคนมในประเทศไทย

การอนุญาตวิจัยในสัตว์

การศึกษานี้ได้รับอนุญาตใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ ตามเอกสารอนุญาตเลขที่ ACKU64-AGR-025

คำขอบคุณ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการเพิ่มศักยภาพทางพันธุกรรมด้วยนวัตกรรมและการบูรณาการดิจิทัลเพื่อการผลิตปศุสัตว์ที่ยั่งยืนในประเทศไทย (FF(KU) 54.67) ภายใต้การพัฒนานหน่วยวิจัยเฉพาะทางพันธุศาสตร์สัตว์เขตร้อนขึ้น (Tropical Animal Genetics Special Research Unit) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย และเกษตรกรผู้เลี้ยงโคนมทุกท่านสำหรับความร่วมมือและการอนุเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2568. สถิติภูมิอากาศของประเทศไทย. แหล่งข้อมูล: <https://data-service.tmd.go.th/myorder.php>. ค้นเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568.
- Bengtsson, C., J. R. Thomassen, M. Kargo, A. Bouquet, and M. Slagboom. 2022. Emphasis on resilience in dairy cattle breeding: Possibilities and consequences. *Journal of Dairy Science*. 105: 7588–7599.
- Berghof, T., M. Poppe, and H. Mulder. 2019. Opportunities to improve resilience in animal breeding programs. *Frontiers in Genetics*. 9: 692.
- Bhat, R., and F. Infascelli. 2025. The path to a sustainable dairy industry: Addressing challenges and embracing opportunities. *Sustainability*. 17: 3766.
- Bonekamp, G., M. Poppe, J. ten Napel, C. Kamphuis, Y. de Haas, and I. Adriaens. 2022. Comparison of milk yield based resilience indicators across dairy cattle breeds. pp. 402–405. In *Proceedings of the 12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP)*. Rotterdam, Netherlands.
- Boonkum, W., W. Teawyoneyong, V. Chankitisakul, M. Duangjinda, and S. Buaban. 2024. Impact of heat stress on milk yield, milk fat-to-protein ratio, and conception rate in Thai–Holstein dairy cattle: A phenotypic and genetic perspective. *Animals*. 14: 3026.
- Colditz, I. G., and B. C. Hine. 2016. Resilience in farm animals: Biology, management, breeding and implications for animal welfare. *Animal Production Science*. 56: 1961–1983.
- Fathoni, A., W. Boonkum, V. Chankitisakul, S. Buaban, and M. Duangjinda. 2025. Pleiotropic genes affecting milk production, fertility, and health in Thai–Holstein crossbred dairy cattle: A GWAS approach. *Animals*. 15: 1320.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. Country programming framework (CPF) Thailand 2018–2022. FAO Representation in Thailand, Bangkok, Thailand.
- Kašná, E., L. Zavadilová, and J. Vařeka. 2025. Genetic evaluation of resilience indicators in Holstein cows. *Animals*. 15: 667.
- Keßler, F., R. Wellmann, M. G. G. Chagunda, and J. Bennewitz. 2024. Resilience indicator traits in 3 dairy cattle breeds in Baden-Württemberg. *Journal of Dairy Science*. 107: 3780-3793.
- Keßler, F., R. Wellmann, M. G. G. Chagunda, and J. Bennewitz. 2025. Toward a resilience selection index with indicator traits in German Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 108: 726-734.
- Konkruea, T., S. Koonawootrittriron, M. A. Elzo, and T. Suwanasopee. 2017. Genetic parameters and trends for daughters of imported and Thai Holstein sires for age at first calving and milk yield. *Agriculture and Natural Resources*. 51: 420-424.
- Koonawootrittriron, S., M. A. Elzo, S. Tumwasorn, and W. Sintala. 2001. Lactation curves and prediction of daily and accumulated milk yields in a multibreed dairy herd in Thailand using all daily records. *Thai Journal of Agricultural Science*. 34: 123–139.
- Koonawootrittriron, S., M. A. Elzo, and T. Thongprapi. 2009. Genetic trends in a Holsteinxother breeds multibreed dairy population in Central Thailand. *Livestock Science*. 122: 186-192.

- Oloo, R. D., R. Mrode, J. Bennewitz, C. C. Ekine-Dzivenu, J. M. Ojango, G. Gebreyohanes, O. A. Mwai, and M. G. Chagunda. 2023. Potential for quantifying general environmental resilience of dairy cattle in sub-Saharan Africa using deviations in milk yield. *Frontiers in Genetics*. 14: 1208158.
- Poppe, M., R. F. Veerkamp, M. Van Pelt, and H. A. Mulder. 2020. Exploration of variance, autocorrelation, and skewness of deviations from lactation curves as resilience indicators for breeding. *Journal of Dairy Science*. 103: 1667–1684.
- Poppe, M., R. F. Veerkamp, H. A. Mulder, and H. Hogeveen. 2022. Observational study on associations between resilience indicators based on daily milk yield in first lactation and lifetime profitability. *Journal of Dairy Science*. 105: 8158–8176.
- Priyadharshini, P., A. Rani, G. Gopal, M. Sabyasachi, P. C. Lalremruati, V. Vikas, and T. Raja. 2025. Genetic analysis of novel resilience indicators for heat stress-induced milk loss in Indian Sahiwal cattle. *Tropical Animal Health and Production*. 57: 494.
- Sammad, A., Y. J. Wang, S. Umer, H. Lirong, I. Khan, A. Khan, B. Ahmad, and Y. Wang. 2020. Nutritional physiology and biochemistry of dairy cattle under the influence of heat stress: Consequences and opportunities. *Animals*. 10: 793.
- SAS Institute Inc. 2014. *SAS OnDemand for Academics: User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Scheffer, M., J. E. Bolhuis, D. Borsboom, T. G. Buchman, S. M. W. Gijzel, D. Goulson, J. E. Kammenga, B. Kemp, I. A. van de Leemput, S. Levin, C. M. Martin, R. J. F. Melis, E. H. van Nes, L. M. Romero, and M. G. M. Olde Rikkert. 2018. Quantifying resilience of humans and other animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115: 11883-11890.
- Sell-Kubiak, E., E. F. Knol, and M. Lopes. 2022. Evaluation of the phenotypic and genomic background of variability based on litter size of Large White pigs. *Genetics Selection Evolution*. 54: 1.
- Thammahakin, P., A. Yawongsa, and T. Rukkwamsuk. 2024. Effect of heat stress on subsequent estrous cycles induced by PGF2 α in Cross-Bred Holstein dairy cows. *Animals*. 14: 2009.
- Wolf, C. A., and D. A. Sumner. 2001. Are farm size distributions bimodal? Evidence from kernel density estimates of dairy farm size distributions. *American Journal of Agricultural Economics*. 83: 77–88.