การประเมินพันธุกรรมของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมต่อความเครียดเนื่องจากความร้อนในโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ภายใต้สภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

Genetic evaluation of milk yield and fat to protein ratio of milk traits on heat stress in crossbred Thai-Holstein dairy cattle under climate conditions of Thailand

วัชรพงษ์ เตียวยืนยง[1], มนต์ชัย ดวงจินดา[1,2], สายัณห์ บัวบาน[3], จุรีรัตน์ แสนโภชน์[3] และ วุฒิไกร บุญคุ้ม[1,2*]

Watcharapong Teawyuneyong[1], Monchai Duangjinda[1,2], Sayan Buaban[3], Jureeatn Sanpote[3] and Wuttigrai Boonkum[1,2*]

บทคัดย่อ: ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นส่งผลให้โคนมเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนได้ง่าย นอกจากนั้นในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยยังมีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้การแสดงออกทางพันธุกรรมของสัตว์แต่ละตัวมีความแตกต่างกันด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้จึงเพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมระหว่างพันธุกรรมของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมกับสภาพแวดล้อม (GxE interaction) และเพื่อประเมินพันธุกรรมโคนมเพื่อคัดเลือกเป็นพ่อแม่พันธุ์ชั้นเลิศในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมในวันทดสอบของโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ที่ให้น้ำนมในระยะแรกจำนวน 119,073 บันทึก จากโคนมทั้งหมด 15,023 ตัว โดยแบ่งชุดข้อมูลเป็น 6 ชุด มีจำนวนบันทึก ค่าเฉลี่ยผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนม ดังนี้ 1) ทุกภูมิภาค 119,073 บันทึก 12.41 กิโลกรัม และ 1.16 2) ภาคกลาง 33,295 บันทึก 12.12 กิโลกรัม และ 1.22 3) ภาคเหนือ 22,227 บันทึก 13.11 กิโลกรัม และ 1.13 4) ภาคตะวันออก 18,114 บันทึก 11.03 กิโลกรัม และ 1.20 และ 5) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 30,325 บันทึก 13.16 กิโลกรัม และ 1.09 ตามลำดับ ใช้โมเดลวันทดสอบที่มีการวัดซ้ำหลายลักษณะ (multiple-trait repeatability model) ร่วมกับการใช้ฟังก์ชันดัชนีอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ (THI function) พบค่าอัตราพันธุกรรม (h^2) จากที่จุดวิกฤตของความเครียดที่ THI 75 ของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนม ดังนี้ 1) ทุกภูมิภาค 0.16 และ 0.03 2) ภาคกลาง 0.17 และ 0.02 3) ภาคเหนือ 0.19 และ 0.03 4) ภาคตะวันออก 0.16 และ 0.05 5) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 0.13 และ 0.06 ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้พบว่า GxE interaction ซึ่งพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ทางพันธุกรรม (r_g) ระหว่างลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมต่ออิทธิพลความเครียดเนื่องจากความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคมีสหสัมพันธ์เชิงลบดังนี้ 1) ทุกภูมิภาค -0.06 และ -0.55 2) ภาคกลาง -0.07 และ

[1] ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002
Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

[2] กลุ่มวิจัยโคนมทนร้อน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002
Thermo-tolerance Dairy Cattle Research Group, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

[3] สำนักเทคโนโลยีชีวภาพการผลิตปศุสัตว์ กรมปศุสัตว์ ปทุมธานี 12000
Bureau of Biotechnology in Livestock Production, Department of Livestock Development, Pathumthani, 12000

* Corresponding author: wboonkum@gmail.com

-0.60 3) ภาคเหนือ -0.39 และ -0.63 4) ภาคตะวันออก -0.003 และ -0.80 5) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ -0.24 และ -0.22 ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษานี้ทำให้ทราบพ่อแม่พันธุ์ที่มีพันธุกรรมของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนที่ดีที่สุดของแต่ละภูมิภาค เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงพันธุกรรมโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ของประเทศไทยต่อไปในอนาคต
คำสำคัญ : ปฏิกิริยาร่วมระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม, ความเครียดเนื่องจากความร้อน, โคนม

ABSTRACT: Thailand is located in the tropics, resulting in dairy cows stress due to heat easily. In addition, each region of Thailand has different climatic conditions. As a result the genetic expression of each animal is different. Therefore, the objectives of this study were to investigate the interaction between genetic and environment (GxE interaction) of milk yield and fat to protein ratio of milk and to evaluate genetic performance for selection of elite bulls and cows in each region of Thailand. 119,073 records from 15,023 crossbred Thai-Holstein dairy cattle of test day milk yield and fat to protein ratio of milk of first lactation were analyzed. The data set is 6 set includes number of records, mean of milk yield and fat to protein ratio of milk 1) all regions 119,073 records, 12.41 kg and 1.16, 2) Central 33,295 records, 12.12 kg and 1.22, 3) Northern 22,227 records, 13.11 kg and 1.13, 4) Eastern 18,114 records, 11.03 kg and 1.20 and 5) North-eastern 30,325 records, 13.16 kg and 1.09, respectively. Analyzing data by multiple-trait repeatability model included THI function. Heritability (h^2) of milk yield and fat to protein ratio of milk at threshold point THI 75 found that 1) all regions 0.16 and 0.03 2) central 0.17 and 0.02 3) Northern 0.19 and 0.03 4) Eastern 0.16 and 0.05 5) North-eastern 0.13 and 0.06 respectively. The study found that GxE interaction was occurred, considering the genetic correlation (r_g) between milk yield and fat to protein ratio of milk to heat stress different each regions mainly has negative genetic correlation 1) all regions -0.06 and -0.55 2) Central -0.07 and -0.60 3) Northern -0.39 and -0.63 4) Eastern -0.003 and -0.80 and 5) North-eastern -0.24 and -0.22. Genetic evaluation was found elite bulls and dams for milk yield and fat to protein ratio of milk in each region for apply to genetic improvement crossbred Thai-Holstein dairy cattle of Thailand in the future.
Keywords: G x E interaction, heat stress, dairy cattle

บทนำ

ภูมิอากาศของประเทศไทยมีลักษณะร้อนชื้น เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้โคนมเกิดภาวะเครียดเนื่องจากความร้อน อย่างไรก็ตามโคนมพันธุ์โฮลสไตน์เป็นพันธุ์โคนมที่นิยมเลี้ยงเนื่องจากมีผลผลิตน้ำนมสูง แต่ความสามารถในการทนร้อนต่ำ ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ปริมาณการกินได้ ผลผลิตน้ำนม จำนวนวันให้น้ำนม (West, 2003) และองค์ประกอบในน้ำนมลดลง (กนกกาญจน์ และคณะ, 2558) แม้ว่าในปัจจุบันได้มีแนวทางการแก้ปัญหาความเครียดเนื่องจากความร้อนหลายวิธี เช่น การจัดการด้านอาหารให้มีพลังงานที่ต่ำลงเพื่อลดกระบวนสร้างความร้อนในร่างกาย การติดตั้งพัดลมไอน้ำเพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากร่างกายของโค (Kelster et al., 2002) และในทางการปรับปรุงพันธุกรรมมีการประเมินพันธุกรรมโคนมที่มีความสามารถทางพันธุกรรมต่อการทนความเครียดเนื่องจากความร้อน โดยการนำฟังก์ชันดัชนีความชื้นสัมพัทธ์ (temperature-humidity index, THI) เข้าร่วมในการประเมินพันธุกรรม เพื่อคัดเลือกโคนมที่มีความสามารถในการทนร้อนได้ดี (Ravagnolo et al., 2000; Boonkum, 2011) กล่าวคือ เมื่อดัชนีของอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ถึงจุดวิกฤตของการเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อน โคนมไม่แสดงอาการเครียดเนื่องจากความร้อนและยังคงให้ผลผลิตได้เหมือนสภาพแวดล้อมปกติ นั่นแสดงให้เห็นว่าโคนมดังกล่าวมีความสามารถในการทนร้อนได้ดี

ปัจจุบันการเลี้ยงโคนมนิยมในหลายภูมิภาค ซึ่งแต่ละภูมิภาคมีการจัดการ ชนิดของอาหารและรูปแบบการอาหาร และลักษณะภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การแสดงออกทางด้านพันธุกรรมของโคนมแตกต่างกัน ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า” การเกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม” (Genotype by environment interaction; GxE interaction) ด้วยเหตุนี้การประเมินพันธุกรรมโคนมควรให้ความสำคัญกับการเกิด GxE interaction โดยลักษณะที่ใช้ในการ

ศึกษาครั้งนี้คือ ลักษณะผลผลิต (production) สมดุลพลังงาน (energy balance) นอกจากนี้ปัจจัยเนื่องจากสภาพแวดล้อมในความหมายของความเครียดเนื่องจากความร้อนส่งผลกระทบโดยตรงต่อการกินได้ภูมิคุ้มกัน ผลผลิตและองค์ประกอบน้ำนมลดลง ซึ่งลักษณะผลผลิตน้ำนม (milk yield) เป็นลักษณะสำคัญทางเศรษฐกิจ ในขณะที่ลักษณะสมดุลพลังงานนั้นบ่งบอกถึงพลังงานที่ได้รับเข้ามาเท่ากับพลังงานที่ใช้ในแต่ละวันซึ่งปัญหาที่พบมากในประเทศไทยนั่นคือ การขาดสมดุลพลังงาน (negative energy balance) ในช่วงหลังคลอด (post parturition) กล่าวคือ พลังงานที่ได้รับไม่เพียงพอต่อพลังงานที่จะใช้ในแต่ละวัน และส่งผลกระทบต่อเนื่องไปยังผลผลิตน้ำนมของโคนมที่ผลิตได้มีปริมาณลดลง และหากภาวะการขาดสมดุลพลังงานทวีความรุนแรงมากขึ้นอาจนำมาซึ่งการคัดทิ้งโคนมออกจากฝูง อย่างไรก็ตามการวัดสมดุลพลังงานมีค่าใช้จ่ายที่สูงและมีขั้นตอนที่ซับซ้อน (Buttchereit et al., 2012) ปัจจุบันการตรวจวัดสมดุลพลังงานในประชากรโคนมขนาดใหญ่นิยมใช้ตัวชี้วัดทางอ้อมนั่นคือ การวัดจากสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนม (fat to protein ratio of milk) มีวิธีการที่ง่ายและสะดวกในการเก็บข้อมูล ซึ่งเมื่อโคนมขาดสมดุลพลังงานจะมีการสลายไขมัน (lipolysis) เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงาน โดยจะพบว่าปริมาณของไขมันในน้ำนมจะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณโปรตีนจะลดลง ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้การขาดสมดุลพลังงานในโคนมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมระหว่างพันธุกรรมของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมกับสภาพแวดล้อม (GxE interaction) และประเมินพันธุกรรมโคนมเพื่อคัดเลือกเป็นพ่อแม่พันธุ์ชั้นเลิศ ในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย

วิธีการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลระยะการให้นมครั้งแรก (first lactation) ของโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ได้แก่ ข้อมูลผลผลิตน้ำนมและ ข้อมูลสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมในวันทดสอบจำนวน 119,073 บันทึก จากแม่โคนมทั้งหมด 15,023 ตัว ซึ่งเก็บบันทึกในช่วงปี พ.ศ. 2534-2554 โดยข้อมูลทั้งหมดบันทึกและเก็บรวบรวมจากเกษตรกรเครือข่ายของกรมปศุสัตว์ภายใต้โครงการ Master bull project ซึ่งสามารถจำแนกโคนมออกเป็น 5 กลุ่ม ตามระดับสายเลือดของโคนมพันธุ์โฮลสไตน์ ดังนี้ 50.0-74.9%, 75.0%, >75.0-87.4%, 87.5-93.74% และ ≥93.75% ตามลำดับ ข้อมูลทั้งหมดสุ่มมาจากจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศไทยเพื่อเป็นตัวแทนโคนมในแต่ละภูมิภาค ดังนั้นจึงจำแนกข้อมูลได้เป็น 4 ภูมิภาค ประกอบด้วย 1) ภาคกลาง (ลพบุรี พิษณุโลก เพชรบูรณ์ สระบุรี) 2) ภาคตะวันออก (จันทบุรี ชลบุรี สระแก้ว) 3) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (นครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น) 4) ภาคภาคเหนือ (เชียงใหม่) สำหรับข้อมูลสภาพภูมิอากาศได้รับความอนุเคราะห์จากกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งจะเลือกสถานีที่ใกล้เคียงกับที่ตั้งฟาร์มโคนมมากที่สุด (เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางพันธุกรรม) โดยข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์แสดงใน Table 1

วิธีวิเคราะห์และโมเดลที่ใช้ในการศึกษา

การวิเคราะห์องค์ประกอบความแปรปรวน (variance components) ของลักษณะทั้งสองที่ศึกษาใช้วิธี expectation-maximization restricted maximum likelihood (EM-REML) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป REMLF90 (Misztal, 1999) โดยใช้จุดวิกฤตที่ 75 (Boonkum et al., 2011) เป็นค่าบ่งบอกว่าโคนมแต่ละตัวเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนหรือไม่ภายใต้โมเดลวันทดสอบที่มีการวัดซ้ำหลายลักษณะ multiple-trait repeatability model; MT-RM) และประเมินค่าการผสมพันธุ์ด้วยวิธี best linear unbiased prediction (BLUP) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป BLUPF90 DAIRY PAK 3.0 (Duangjinda et al., 2005) ซึ่งมีรูปแบบโมเดลดังนี้

$$y_{ijklm} = HMY_i + DIM_k BG_j + AFC_l + \alpha_m + \nu_m[f(THI)] + p_m + q_m[f(THI)] + e_{ijklm}$$

เมื่อ y_{ijklm} คือ เวคเตอร์ของผลผลิตน้ำนม และสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมรายตัวในวันทดสอบของโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ตัวที่ m, HMY_i คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลคงที่เนื่องจากฝูง-เดือนทดสอบ-ปีทดสอบ โดยจัดแบบ class ที่ i, $DIM_k BG_j$ คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลคงที่เนื่องจากกลุ่มพันธุ์ (BG) จัดแบบ class (1-5) ที่ j ร่วมกับเวคเตอร์ของอิทธิพลคงที่เนื่องจากวันให้ผลผลิต (DIM) จัดแบบ class (1-12) ที่ k, AFC_l คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลคงที่เนื่องจากอายุเมื่อคลอดลูกครั้งแรกจัดแบบ class ที่ l, α_m คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากยีนแบบบวกสะสม ณ สภาวะไม่เกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนของสัตว์ตัวที่ m, n_m คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากยีนแบบบวกสะสม ณ สภาวะเครียดเนื่องจากความร้อนของสัตว์ตัวที่ m, p_m คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มสภาพแวดล้อมถาวร ณ สภาวะไม่เกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนของสัตว์ตัวที่ m, q_m คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากสภาพแวดล้อมถาวร ณ สภาวะเครียดเนื่องจากความร้อนของสัตว์ตัวที่ m, e_{ijklm} คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากความคลาดเคลื่อน, A คือเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวสัตว์, I คือ identity matrix และ $f(THI)$ คือ ฟังก์ชันดัชนีอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$f(THI)$ คือ ฟังก์ชันดัชนีอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$f(THI) = \begin{cases} 0 & ;THI \le THI_{75} \ (no heat stress), \\ THI - THI_{75} & ;THI > THI_{75} \ (heat stress) \end{cases}$$

เขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้ $\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 & 0 \\ 0 & W_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$

โดย $\begin{bmatrix} \alpha \\ p \\ e \end{bmatrix} \sim NID(0, V) \ when \ V\begin{bmatrix} \alpha \\ p \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \otimes A & 0 & 0 \\ 0 & P \otimes I & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$

เมื่อ y_1 และ y_2 คือ เวคเตอร์ของค่าสังเกตของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนม, β_1 และ β_2 คือเวคเตอร์ของอิทธิพลคงที่ได้แก่ ฝูง-เดือนทดสอบ-ปีทดสอบ, กลุ่มพันธุ์, วันให้ผลผลิต, และอายุเมื่อคลอดลูกครั้งแรก ตามลำดับ, α_2 และ α_2 คือเวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากพันธุกรรมแบบบวกสะสม, p_1 และ p_2 คือเวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากสภาพแวดล้อมถาวร, X_1, X_2, Z_1, Z_2, W_1, W_2 คือ incidence matrices ที่แสดงการปรากฏของอิทธิพล β_1, β_2, α_1, α_2, p_1, p_2 ในแต่ละค่าสังเกตตามลำดับ, e_1 และ e_2 คือ เวคเตอร์ของอิทธิพลสุ่มเนื่องจากความคลาดเคลื่อน, A คือ numerator genetic relationship ระหว่างตัวสัตว์, G และ P คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมของสัมประสิทธิ์ฟังก์ชั่นของยีนแบบบวกสะสมและสภาพแวดล้อมถาวรในสัตว์แต่ละตัว และ R คือเมทริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (diagonal matrix) ซึ่งอยู่ในรูปของ $I\alpha_e^2$

การประเมินพันธุกรรมโดย $u_n f(THI) = Z'_{f(THI)}\hat{a}_n$ เมื่อ $u_n f(THI)$ คือ ค่าการผสมพันธุ์ของสัตว์ตัวที่ n ในสภาวะความเครียดเนื่องจากความร้อน, $Z'_{f(THI)}$ คือเวคเตอร์ฟังก์ชันอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ และ $\hat{a}_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ประเมินได้ตามฟังก์ชันอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ของสัตว์ตัวที่ n

$$I = \upsilon_{MY} EBV_{MY} + \upsilon_{FPR} EBV_{FPR}$$
$$I = 0.7 EBV_{MY} + 0.3 EBV_{FPR}$$

เมื่อ I คือดัชนีการคัดเลือก, v_{MY} และ v_{FPR} คือ ค่าทางเศรษฐกิจของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนม, EBV_{MY} และ EBV_{FPR} คือ ค่าการผสมพันธุ์ของลักษณะผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนม การศึกษาครั้งได้กำหนดค่า v_{MY} เป็นแบบค่าทางเศรษฐกิจสัมพัทธ์โดยให้ความสำคัญเท่ากับ 70% ในขณะที่ค่า v_{FPR} กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 30% เนื่องจากลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ไม่สูงหรือต่ำมากไป) โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมของฝูงที่ศึกษาในครั้งนี้

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางพันธุกรรม

การประมาณค่าอัตราพันธุกรรม (heritability, h^2) ของลักษณะที่ศึกษาโดยพิจารณาอิทธิพลเนื่องจากความเครียดเนื่องจากความร้อนร่วมด้วยมีรูปแบบสมการคำนวณตาม Ravagnolo and Misztal (2000) ได้นำเสนอดังนี้

$$h^2_{f(i)} = \frac{\sigma^2_a + f(i)^2\sigma^2_v + 2f(i)\sigma_{av}}{\sigma^2_a + f(i)^2\sigma^2_v + 2f(i)\sigma_{av} + \sigma^2_p + f(i)^2\sigma^2_q + 2f(i)\sigma_{pq} + \sigma^2_e}$$

การประมาณค่าสหสัมพันธ์ทางพันธุกรรมระหว่างพันธุกรรมกับอิทธิพลความเครียดเนื่องจากความร้อน (genetic correlation, r_g) มีรูปแบบสมการคำนวณตาม Ravagnolo and Misztal (2000) ได้นำเสนอดังนี้

$$r_{g(a,f(i)v} = \frac{f(i)\sigma_{av}}{\sqrt{\sigma^2_a x f(i)^2\sigma^2_v}}$$

เมื่อ σ^2_a คือ ความแปรปรวนทางพันธุกรรมแบบบวกสะสม ณ สภาวะไม่เกิดความเครียดเนื่องจากความร้อน, σ^2_v คือความแปรปรวนทางพันธุกรรมแบบบวกสะสม ณ สภาวะเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อน, σ_{av} คือ ความแปรปรวนร่วมระหว่างพันธุกรรมแบบบวกสะสมกับอิทธิพลความเครียดเนื่องจากความร้อน, σ^2_p คือ ความแปรปรวนเนื่องจากสภาพแวดล้อมถาวร ณ สภาวะไม่เกิดความเครียดเนื่องจากความร้อน, σ^2_q คือ ความแปรปรวนเนื่องจากสภาพแวดล้อมถาวร ณ สภาวะเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อน, σ_{pq} คือ ความแปรปรวนร่วมระหว่างสภาพแวดล้อมถาวรและอิทธิพลความเครียดเนื่องจากความร้อน, σ^2_e คือ ความคลาดเคลื่อน และ $f(i)$ คือระดับค่าความเครียดเนื่องจากความร้อน

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ลักษณะที่ศึกษา

ใน Table 1 แสดงให้เห็นถึงผลผลิตน้ำนมในวันทดสอบของโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ที่ให้ผลผลิตน้ำนมในระยะแรก มีค่าเฉลี่ยทุกภูมิภาค 12.41 กิโลกรัม/ตัว/วัน โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือมีผลผลิตน้ำนมในวันทดสอบเฉลี่ย 13.16 และ 13.11 กิโลกรัม/ตัว/วัน ตามลำดับซึ่งสูงกว่าภาคอื่นๆ ในขณะที่ภาคตะวันออกมีผลผลิตน้ำนมในวันทดสอบต่ำสุดที่ 11.03 กิโลกรัม/ตัว/วัน ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานวิจัยของจุรีรัตน์และคณะ (2553) พบว่าผลผลิตน้ำนมในวันทดสอบของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.60 กิโลกรัม และภาคตะวันออก 11.30 กิโลกรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ผลผลิตน้ำนมสอดคล้องกับข้อมูลสภาพภูมิอากาศโดยพบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือมีอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ และดัชนีความชื้นสัมพัทธ์ (THI) ต่ำกว่าภาคอื่นๆ ในทางตรงกันข้ามในภาคตะวันออกมีค่าดังกล่าวสูงที่สุดซึ่งหมายความว่าโคนมในภาคตะวันออกได้รับผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศมากกว่าภาคอื่นๆ ของประเทศไทยโดยแสดงผลลัพธ์ในรูปของการลดลงของผลผลิตน้ำนม

ลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมของประชากรโคนมที่ศึกษาครั้งนี้มีค่าเฉลี่ยทุกภูมิภาคเท่ากับ 1.16 และมีค่าเฉลี่ยแยกในแต่ละภูมิภาคอยู่ในช่วง 1.09-1.22 ดังแสดงใน **Table 1** ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรายงานวิจัยของวันทนา (2558) และ Puangdee (2015) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับรายงวิจัยของ Negussie et al. (2013) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยนั่นอาจเกิดจากประชากรที่มีการศึกษาครั้งนี้เป็นโคนมลูกผสมในขณะที่ประชากรอ้างอิงเป็นโคนมพันธุ์แท้ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาของ Abdullahpour et al. (2013) ชี้ให้เห็นถึงสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมที่เหมาะสมคือควรอยู่ในช่วง 1.00-1.50 ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าประชากรโคนมที่ศึกษาไม่ได้รับผลกระทบจากภาวะขาดสมดุลพลังงาน

Table 1 Data structure of test-day milk yield (kg), test-day fat to protein ratio of milk and relative humidity (%) various region of Thailand in this study

Categories	All regions	Northern	Eastern	North-Eastern	Central
Test-day record, n	119,073	22,227	18,114	30,325	33,295
Animal with records, n	15,023	2,736	2,257	3,802	4,218
Animal with pedigrees, n	15,023	2,736	2,257	3,802	4,218
Average 305-d milk yield, kg	3,770	3,998	3,291	4,008	3,694
Average test-day milk yield, kg	12.41	13.11	11.03	13.16	12.12
Average test-day fat, %	3.65	3.60	3.76	3.50	3.82
Average test-day protein, %	3.20	3.22	3.18	3.27	3.17
Average test-day fat to protein ratio of milk	1.16	1.13	1.20	1.09	1.22
Minimum and maximum of test-day fat to protein ratio of milk	0.23/2.40	0.24/2.38	0.41/2.40	0.23/2.40	0.28/2.40
Average relative humidity, %	72.50	72.44	74.23	71.00	71.88
Average temperature, %	27.52	25.61	27.97	27.11	27.93
Average temperature-humidity index, THI	77.97	74.99	78.89	77.14	78.53

ค่าพารามิเตอร์ทางพันธุกรรม (genetic parameters)

ค่าอัตราพันธุกรรม (heritability, h^2)

ค่าเฉลี่ยอัตราพันธุกรรมของลักษณะผลผลิตน้ำนมพบว่าทุกภูมิภาคมี h^2 อยู่ในระดับต่ำ 0.16 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการให้ผลผลิตน้ำนมส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นผลจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม ดังแสดงใน **Table 2** ซึ่งแตกต่างกับรายงานวิจัยของจุรีรัตน์ และคณะ (2553) และ วุฒิไกร และมนต์ชัย (2557) ที่รายงานค่าอัตราพันธุกรรมอยู่ในช่วงปานกลาง (0.20-0.40) ทั้งนี้เนื่องจากใช้โมเดลที่ทดสอบแตกต่างกัน ในขณะเดียวกันค่าอัตราพันธุกรรมของลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมพบว่าทุกภูมิภาคมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.02-0.06 (**Table 3**) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงาน h^2 ของโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ที่ให้น้ำนมระยะแรกของ วันทนา (2558) โดยมีค่าเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมเป็นลักษณะที่สะท้อนถึงภาวะสมดุลพลังงานของโคนมซึ่งเป็นลักษณะเชิงคุณภาพ โดยปกติลักษณะเชิงคุณภาพค่าอัตราพันธุกรรมจะมีค่าต่ำ ดังนั้นในการปรับปรุงลักษณะดังกล่าวให้ดีขึ้นการจัดการสภาพแวดล้อม ได้แก่ การเลี้ยงดู อาหารและการให้อาหาร จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนามากกว่าพันธุกรรม

ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับความเครียดเนื่องจากความร้อน (genetic correlation between the genetic and heat stress additive effect, r_g)

ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะผลผลิตน้ำนมกับความเครียดเนื่องจากความร้อนมีค่า r_g ในเชิงลบ (negative genetic correlation) ในทุกภูมิภาค ภาค

ตะวันออก และภาคกลางมีค่าเท่ากับ -0.06, -0.003 และ -0.07 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ และภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือมีค่า -0.39 และ -0.24 อยู่ในระดับกลาง แสดงให้เห็นถึงความร้อนมีผลต่อผลผลิตน้ำนม ซึ่งบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนผลผลิตน้ำนมจะลดลง สอดคล้องกับ Boonkum et al. (2011) พบค่า r_g มีค่า -0.21 ในโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์ที่ให้น้ำนมระยะแรก ในขณะเดียวกันค่าสหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมกับความเครียดเนื่องจากความร้อนมีค่า r_g ในเชิงลบเช่นกันแต่มีค่าอยู่ในช่วง -0.22 ถึง -0.80 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของความเครียดเนื่องจากความร้อนมีผลกระทบต่อลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมรุนแรงมากกว่าลักษณะผลผลิตน้ำนม ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราพันธุกรรมที่วิเคราะห์ได้ ดังนั้นการคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและหาวิธีการรับมืออย่างเหมาะสมจะช่วยให้ภาวะการขาดสมดุลพลังงานในโคนมของประเทศไทยลดลงได้ (Table 2 และ Table 3)

Table 2 Analysis of variance components and estimated heritability of milk yield.

Parameters	All regions	Northern	Eastern	North-Eastern	Central
Additive genetic variance, kg^2, 10^4 (σ_a^2)	15,690	16,520	15,240	13,200	18,060
Additive genetic variance under heat stress, kg^2, 10^4 (σ_v^2)	41.78	180.30	53.99	71.28	35.84
Covariance between additive genetic and heat stress variance , kg, 10^4 (σ_{av})	-45.21	-672.30	-2.38	-228.20	-57.95
Permanent environmental variance, kg^2, 10^4 (σ_p^2)	54,660	44,210	51,660	57,710	61,350
Permanent environmental variance under heat stress, kg^2, 10^4 (σ_q^2)	803.30	1,557.00	528.40	744.60	741.50
Covariance between permanent environment and heat stress variance , kg, 10^4 (σ_{pq})	-2,740	-2,836	-2,377	-2,763	-2,847
Error variance, kg^2, 10^4 (σ_e^2)	30,190	27,430	30,000	32,800	29,590
Total variance, 10^4 (σ_T^2)	101,385.08	89,897.30	97,482.39	104,525.88	109,777.34
Heritability, (h^2)	0.16	0.19	0.16	0.13	0.17
Genetic correlation between the genetic and heat stress effect, (r_g)	-0.06	-0.39	-0.00	-0.24	-0.07

Table 3 Analysis of variance components and estimated heritability of fat to protein ratio of milk.

Parameters	All regions	Northern	Eastern	North-Eastern	Central
Additive genetic variance, 10^4 (σ_a^2)	16.99	12.82	28.93	45.17	14.92
Additive genetic variance under heat stress, 10^4 (σ_v^2)	0.35	1.22	0.74	0.42	0.35
Covariance between additive genetic and heat stress variance, 10^4 (σ_{av})	-1.35	-2.49	-3.67	-0.94	-1.37
Permanent environmental variance, 10^4 (σ_p^2)	143.60	94.86	130.10	194.30	124.50
Permanent environmental variance under heat stress, 10^4 (σ_q^2)	2.35	4.40	1.64	3.70	1.62
Covariance between permanent environment and heat stress variance, 10^4 (σ_{pq})	-8.50	-9.91	-8.41	-12.75	-6.45
Error variance, 10^4 (σ_e^2)	484.60	400.20	473.70	514.00	498.30
Total variance, 10^4 (σ_T^2)	647.90	513.49	635.10	757.68	639.69
Heritability, (h^2)	0.03	0.03	0.05	0.06	0.02
Genetic correlation between the genetic and heat stress effect, (r_g)	-0.55	-0.63	-0.80	-0.22	-0.60

ค่าอัตราพันธุกรรมภายใต้ความเครียดเนื่องจากความร้อน (heritability under heat stress)

Figure 1a แสดงให้เห็นถึงแต่ละภูมิภาคเกิดอิทธิพลของ GxE ที่แตกต่างกัน พบว่ารูปแบบของแนวโน้มค่าอัตราพันธุกรรมของลักษณะผลผลิตน้ำนมภายใต้ความเครียดเนื่องจากความร้อน 4 รูปแบบ 1) แนวโน้มค่าอัตราพันธุกรรม เมื่อผ่านจุดวิกฤตที่ 75 พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งพบในในภาคเหนือ 2) ค่าอัตราพันธุกรรมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านจุดวิกฤตแล้วลดต่ำลง ซึ่งพบในส่วนของทุกภูมิภาค และ ภาคกลาง 3) ค่าอัตราพันธุกรรมมีแนวโน้มคงที่เมื่อ THI เพิ่มขึ้น ซึ่งพบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 4) ค่าอัตราพันธุกรรมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อ THI เพิ่มขึ้น ซึ่งพบในภาคตะวันออก โดย Schierenbeck et al. (2011) ให้เหตุผลที่แนวโน้มของค่าอัตราพันธุกรรมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพันธุกรรมของลักษณะที่ศึกษาที่อยู่ในสภาพแวดล้อมและการจัดการที่ไม่เหมาะสม สำหรับ Figure 1b พบว่า รูปแบบของการเกิดแนวโน้มค่าอัตราพันธุกรรมของลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนภายใต้ความเครียดเนื่องจากความร้อน 3 รูปแบบ 1) มีแนวโน้มของค่าอัตราพันธุกรรมลดลงเมื่อผ่านจุดวิกฤตที่ 75 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อผ่านจุด THI ที่ 77 พบในภาคเหนือ 2) มีแนวโน้มของค่าอัตราพันธุกรรมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย พบภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3) มีแนวโน้มของค่าอัตราพันธุกรรมลดลงเมื่อผ่านจุดวิกฤตพบทุกภูมิภาคและภาคตะวันออก แสดงให้เห็นถึงแต่ละภูมิภาคเกิดอิทธิพลของ GxE interaction ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่า h^2 ในแต่ละภูมิภาคแตกต่างกัน

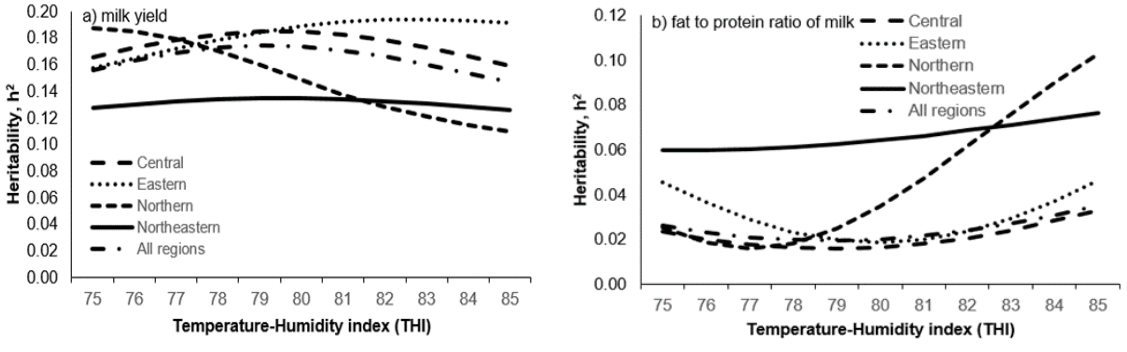

Figure 1 Heritability of milk yield (a) and fat to protein ratio of milk (b) under heat stress in Thailand and separate by region.

การคัดเลือกพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ชั้นเลิศ (selection of elite nucleus herd) **ภายใต้** THI 85

การคัดเลือกพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ชั้นเลิศพิจารณาจากค่าการผสมพันธุ์ (EBV) ที่ THI 85 เนื่องจากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการคัดเลือกพ่อแม่พันธุ์โดยพิจารณาจากผลตอบสนองทางพันธุกรรม ณ ค่า THI ดังกล่าว จะช่วยยืนยันได้ว่าโคนมจะให้ผลผลิตน้ำนมและสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนในน้ำนมที่เหมาะสม อีกทั้งยังมีความสามารถในทนร้อนหรือทนทานต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงในอนาคตได้ดี โดยในการจับคู่ผสมพันธุ์พ่อแม่พันธุ์โคนมที่เหมาะสมในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยสามารถพิจารณาจากรายชื่อพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ดัง Table 4 จะเห็นถึงรายชื่อพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ที่ดีที่สุดในแต่ละภูมิภาคและมีการประเมินค่าความสามารถทางการผลิต (most probable producing ability, MPPA) ซึ่งบอกถึงผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับเมื่อมีค่า THI ถึงระดับ 85 ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรผู้เลี้ยงโคนมสามารถตัดสินใจใช้น้ำเชื้อจากพ่อพันธุ์ หรือคัดเลือกลูกที่เกิดจากแม่พันธุ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Table 4 Top 5 sires and dams on milk yield, fat to protein ratio of milk and selection index of milk yield and fat to protein ratio of milk

Region	Top 5 Sires	MPPA_MY(kg)	MPPA_FP	Top 5 dams	MPPA_MY(kg)	MPPA_FP
All	73HO1745	16.19	1.14	71460149	15.22	1.14
Region	29HO8538	15.96	1.13	NM400124	13.76	1.14
	1HO2639	12.31	1.13	NM400126	12.53	1.12
	71HO1022	10.01	1.17	71481004	12.47	1.15
	81TH239	9.83	1.18	50400091	11.64	1.15
Central	73HO1745	13.60	1.19	16381587	14.01	1.20
	81TH239	11.46	1.20	NM400124	13.83	1.19
	87TH266	10.86	1.19	16441270	11.90	1.20
	87.5TH207	9.74	1.23	NM400126	11.90	1.17
	2197	9.5	1.19	67410457	11.65	1.21
North	042HF	8.55	1.19	50431832	7.30	1.16
	93.25TH221	5.56	1.18	50390029	7.20	1.18
	1HO0617	4.51	1.15	50430062	6.28	1.18
	9HO1648	4.33	1.13	50400091	6.02	1.18
	115HF	3.53	1.20	50432426	5.98	1.15
East	71HO1064	9.74	1.17	27421429	12.45	1.19
	29HO10059	8.40	1.22	27422860	11.80	1.23
	022HF	8.15	1.22	27400795	9.57	1.17
	29HO4397	8.15	1.23	27421408	9.17	1.18
	87TH249	7.81	1.20	22430214	9.64	1.19
North-	025HF	11.99	1.12	40420884	9.78	1.09
east	TMZ69/42	8.88	1.08	30430835	8.40	1.14
	87TH266	8.51	1.11	30452159	7.90	1.14
	100HF	7.39	1.10	30471570	7.50	1.09
	93.75TH225	7.21	1.06	40451227	8.40	1.14

MPPA = most probable producing ability, MPPA_MY = most probable producing ability of milk yield, MPPA_FP= most probable producing ability of fat to protein ratio of milk

สรุปและข้อเสนอแนะ

ความเครียดเนื่องจากความร้อนส่งผลกระทบโดยตรงทั้งลักษณะที่ปรากฏ (ปริมาณผลผลิตลดลง) และพันธุกรรม นอกจากนี้สภาพแวดล้อมในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยยังส่งผลให้การแสดงออกทั้งลักษณะปรากฏและพันธุกรรมแตกต่างกันด้วยเช่นกัน ดังนั้นการพิจารณาคัดเลือกพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ที่เหมาะสมกับภูมิภาคจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อเกษตรกร และจะยังประโยชน์ให้การปรับปรุงพันธุกรรมในแต่ละภูมิภาคสามารถตอบโจทย์ความต้องการของแต่พื้นที่ได้อย่างถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

กนกกาญจน์ รีบเร่งรัมย์, มนต์ชัย ดวงจินดา, สายัณห์ บัวบาน, จุรีรัตน์ แสนโภชน์ และวุฒิไกร บุญคุ้ม. 2558. อิทธิพลของความเครียดเนื่องจากความร้อนต่อพันธุกรรมของลักษณะโปรตีนนมและไขมันนมในโคนมลูกผสมไทย-โฮลสไตน์. แก่นเกษตร. 43: 151-160.

จีระชัย กาญจนพฤฒิพงศ์. 2549. การจัดการฝูงโคนม. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วันทนา เจริญโอสถ, ก้องเกียรติ ศรีสุวรรณ, มนต์ชัย ดวงจินดา, ทองสา บัวสุข, ศรีนวล คณานิตย์ และวุฒิไกร บุญคุ้ม. 2558. การศึกษาความสัมพันธ์ของยีนเครื่องหมายต่อการให้ผลผลิตน้ำนม องค์ประกอบน้ำนมและสมดุลพลังงานในโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์. แก่นเกษตร. 43: 245-254.

วันทนา เจริญโอสถ. 2558. การศึกษาความสัมพันธ์ของยีนเครื่องหมายและประเมินพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสัดส่วนไขมันต่อโปรตีนน้ำนมภายใต้สภาวะเครียดจากความร้อนในโคนมลูกผสมไทยโฮลสไตน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

วุฒิไกร บุญคุ้ม. 2553. เอกสารประกอบการสอน การปรับปรุงพันธุ์โคนม. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. น. 160-164.

วุฒิไกร บุญคุ้ม และ มนต์ชัย ดวงจินดา. 2557. การประมาณค่าพารามิเตอร์ทางพันธุกรรมของลักษณะการให้นมและความคงทนของการให้นมโดยใช้ multi-trait animal model และ random regression test day model ในโคนมลูกผสมโฮลสไตน์ฟรีเซี่ยน. แก่นเกษตร. 42: 260-266.

Abdullahpour, R., M. M. Shahrbabak, A. Nejati-Javaremi, R. V. Torshizi, and R. Mrode. 2013. Genetic analysis of milk yield, fat and protein content in Holstein dairy cow in Iran: Legendre polynomials random regression model applied. Arch. Tierz. 56: 497-508.

Boonkum, W. 2011. Studies on genetics of heat stress effect in Thai crossbred Holsteins. Ph. D. Thesis. Khon Kaen University, Khon Kaen.

Boonkum, W., I. Misztal, M. Duangjinda, V. Pattarajinda, S. Tumwasorn, and S. Buaban. 2011. Short communication: Genetic effects of heat stress on days open for Thai Holstein crossbreds. J. Dairy Sci. 94: 1592-1596.

Buttchereit, N., E. Stamer, W. Junge, and G. Thaller. 2010 Evaluation of five lactation curve models fitted for fat : protein ratio of milk and daily energy balance. J. Dairy Sci. 93: 1702-1712.

Buttchereit, N., E. Stamer, W. Junge, and G. Thaller. 2012. Genetic parameters for energy balance, fat /protein ratio, body condition score and disease traits in German Holstein cows. J. Anim. Breed. Genet. 129: 280-288.

Chanvijit, K., M. Duangjinda, V. Pattarajinda, and C. Reodecha. 2005. Model comparison for genetic evaluation of milk yield in crossbred Holsteins in the tropics. J. Appl. Genet. 46: 387-393.

Cromie, A. R., D. L. Kelleher, F. J. Gordon, and M. Rath. 1998. Genotype by environment interaction in dairy cattle. Interbull Bulletin. 17: 100-104.

Duangjinda, M., I. Misztal, and S. Tsurata. 2005. BLUPF90-ChickenPAK v 2.5: User's Manual. The University of Georgia and Khon Kaen University.

Heuer, C., Y. H. Schukken, and P. Dobbelaar. 1999. Postpartum body condition score and results from the first test day milk as predictors of disease, fertility, yield, and culling in commercial dairy herds. J. Dairy Sci. 82: 295-304.

Kelster, Z. O., K. D. Moss, H. M. Zhang, T. Teegerstrom, R. A. Edling, R. J. Collier, and R. L. Ax. 2002. Physiological responses in thermal stressed Jersey cows subjected to different management strategies. J. Dairy Sci. 85: 3217-3224.

Misztal, I. 1999. Complex models, more data: simpler programming.Proc. Inter. Workshop Comput. Cattle Breed. '99, March 18-20,Tuusala, Finland. Interbull Bull. 20: 33-42.

Morton, J. M., W. P. Tranter, D. G. Mayer, and N. N. Jonsson. 2007. Effects of environmental heat on conception rates in lactating dairy cows: critical periods of exposure. J. Dairy Sci. 90: 2271-2278.

Negussie, E., I. Strandén, and E. A. Mäntysaari. 2013. Genetic associations of test-day fat: protein ratio with milk yield, fertility, and udder health traits in Nordic Red cattle. J. Dairy Sci. 96: 1237-1250.

Puangdee, S. 2015. Genetic parameter estimation of energy balance using milk fat to protein ratio and related traits in tropical dairy cattle by the random regression test day model. Ph. D. Thesis. Khon Kaen University, Khon Kaen.

Ravagnolo, O., and I. Misztal. 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle: parameter estimation. J. Dairy Sci. 83: 2126-2130.

West, J. W. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. J. Dairy Sci. 86: 2131-2144.