เทคโนโลยีการหล่อเย็นเครื่องยนต์กังหันก๊าซ
Gas Turbine Cooling Technology

สืบสกุล คุรุรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ศรีราชา ชลบุรี 20230

Suabsakul Gururatana

Mechanical Engineering Program,

Faculty of Engineering at Sriracha,

Kasetsart University Sriracha Campus, Sriracha, Chonburi, 20230

E-mail: sfengssg@src.ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซสามารถทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกมาจากห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดที่กังหันสามารถทนได้มีจำกัด ดังนั้น การหล่อเย็นใบกังหันก๊าซมีความจำเป็นสำหรับการระบายความร้อนที่เกิดขึ้น บทความนี้นำเสนอวิธีการหล่อเย็น เช่น การหล่อเย็นแบบการพา และการหล่อเย็นแบบฟิล์ม เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการหล่อเย็นสามารถเพิ่มอัตราการหล่อเย็นและการถ่ายโอนความร้อนได้ชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ดังนั้น วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นในการหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับใบกังหันก๊าซ

คำสำคัญ: เครื่องยนต์กังหันก๊าซ ใบกังหันก๊าซ เทคนิคการหล่อเย็น อัตราการถ่ายโอนความร้อน

Abstract

Efficiency of gas turbine engines can be enhanced by increasing the temperature of the gas from combustor. However, the maximum temperature endurable by turbine blades is limited. Therefore, cooling of the blades is necessary for heat dissipation. This paper aims to present conventional methods to cool down the turbine blades such as convection cooling and film cooling. These cooling techniques can clearly enhance cooling and heat transfer rates. However, when the heat transfer rate increases, friction could rise as well. To avoid the turbine blade failure, an optimization method is required to obtain the optimum heat transfer rate.

Keywords: Gas Turbine Engine, Turbine Blade, Cooling Technique, Heat Transfer Rate

1. บทนำ

ในปัจจุบันโลกของเราได้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านเศรษฐกิจ การค้า การลงทุน การท่องเที่ยวระหว่างประเทศไปอย่างมาก การเจรจาต่อรองเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญของธุรกิจ ส่งผลให้การเดินทางไปมาหาสู่กันระหว่างประเทศเพื่อเจรจาต่อรองจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่เกิดขึ้น รูปแบบการเดินทางระหว่างประเทศที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การใช้บริการเครื่องบินโดยสาร นอกจากนี้ ใช้เครื่องบินเพื่อโดยสารภายในประเทศก็เป็นที่นิยมมากขึ้นเช่นเดียวกัน ส่งผลให้เกิดสายการบินต้นทุนต่ำเกิดขึ้นมากมาย ต่อมาอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องบินจึงเติบโตอย่างรวดเร็ว เช่น โรงงานผลิตโครงสร้างเครื่องบิน โรงงานผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โรงงานผลิตอุปกรณ์ตกแต่งภายในเครื่องบิน บริษัทผลิตเครื่องบินยักษ์ใหญ่ของโลก เช่น แอร์บัส และโบอิ้ง ต่างแข่งขันกันพัฒนาเครื่องบินอย่างต่อเนื่องในหลาย ๆ ด้าน เช่น การออกแบบเครื่องบินให้มีสิ่งอำนวยความสะดวกภายในมากขึ้น หรือพัฒนาสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้สูงขึ้น

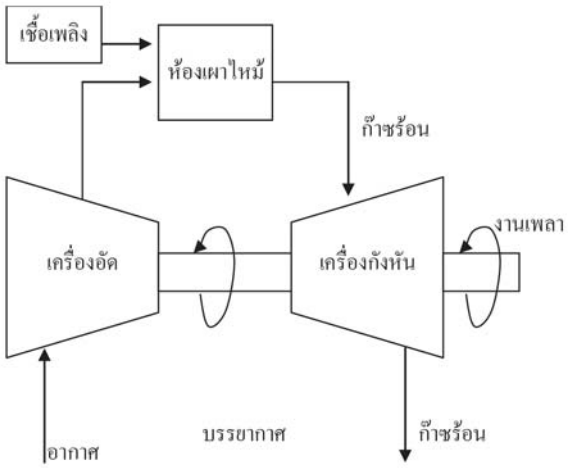
สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้กับเครื่องบินมีหลายแบบเช่น เครื่องยนต์ลูกสูบ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ เป็นต้น แต่เครื่องยนต์ที่ใช้เพื่อการโดยสาร คือ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ เนื่องจากข้อได้เปรียบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือ ให้ค่าอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก (Power to Weight Ratio) ที่สูง ทำให้เครื่องบินลดภาระด้านน้ำหนักของเครื่องยนต์สามารถเดินทางไปได้ไกลขึ้นและแบกรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น นอกจากนี้ เครื่องยนต์กังหันก๊าซยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น เชื้อเพลิงอากาศยาน น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซลได้อีกด้วย สำหรับประเภทของเครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับเครื่องบินนั้นมีด้วยกัน 4 แบบ ได้แก่ เทอร์โบเจ็ท (Turbojet) เทอร์โบแฟน (Turbofan) เทอร์โบปรอป (Turboprop) และ เทอร์โบชาฟต์ (Turboshaft)

เทอร์โบเจ็ทสำหรับเครื่องบินนั้นถูกใช้ทำการบินครั้งแรกในปี 1939 และได้ถูกใช้สำหรับเครื่องบินทางทหารในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ และแรงขับดันที่เทอร์โบเจ็ทสามารถสร้างได้สูงนั่นเอง ถัดมาเทอร์โบแฟนมีส่วนประกอบหลักคล้ายเทอร์โบเจ็ท แต่มีชิ้นส่วนเพิ่มมา คือ ใบพัดขนาดใหญ่ (Fan) ต่อกับด้านหน้าของเครื่องอัดอากาศ (Compressor) เทอร์โบแฟนได้ถูกใช้กับเครื่องบินโดยสารและเครื่องบินขับไล่อย่างแพร่หลายมากกว่าเทอร์โบเจ็ท จากข้อได้เปรียบเรื่องแรงขับดันที่สูงขึ้นประมาณ 70% และเสียงของเครื่องยนต์ที่เบาลง รวมถึงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ลดลงอีกด้วย

ในส่วนเทอร์โบปรอปนั้นงานเพลาที่ได้จากเครื่องยนต์ถูกส่งผ่านไปต่อกับระบบเฟืองเพื่อขับเคลื่อนใบพัดเครื่องบิน (Propeller) ในการสร้างแรงขับดันร่วมกับไอพ่นที่ออกมาด้านท้ายเครื่องยนต์ มักใช้กับเครื่องบินใบพัดที่มีความเร็วน้อยกว่าเสียง เพราะประหยัดเชื้อเพลิงมากกว่าเทอร์โบแฟน สุดท้ายเทอร์โบชาฟต์ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับเทอร์โบปรอป แต่แตกต่างกันที่เทอร์โบชาฟต์นำงานเพลาที่ได้ไปใช้เพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้แรงขับดันจากไอพ่นจากเครื่องยนต์ เทอร์โบชาฟต์มักใช้ในเฮลิคอปเตอร์ รถถัง รวมถึงเรืออีกด้วย

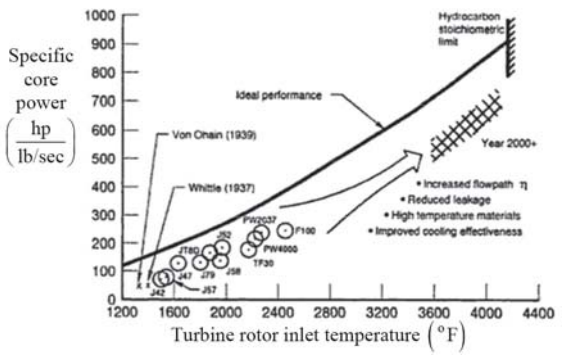
ส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์กังหันก๊าซมี 3 ชิ้นดังภาพที่ 1 ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ ห้องเผาไหม้ (Combustor) และเครื่องกังหัน (Turbine) สำหรับหลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นอากาศภายนอกจะถูกดูดเข้าเครื่องอัดอากาศเพื่อให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นอากาศจะถูกส่งต่อเข้าห้องเผาไหม้

โดยมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้ามาเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ก๊าซร้อนที่ได้จะมาไหลผ่านเครื่องกังหันที่มีชุดกังหันอยู่ภายใน การไหลผ่านชุดกังหันนี้ส่งผลให้กังหันหมุน เครื่องกังหันนี้ต่อกับเพลาและเครื่องอัด งานเพลาที่ได้สามารถนำไปใช้ต่อที่เครื่องอัดอากาศเพื่ออัดอากาศต่อไป



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ในการเพิ่มสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นนั้น วิธีที่นิยมใช้คือ การทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้ หรืออุณหภูมิของก๊าซที่เข้าเครื่องกังหัน (Turbine Inlet Temperature หรือย่อเป็น TIT) มีค่าสูงขึ้นและทำให้งานของวัฏจักรกังหันก๊าซสูงขึ้นตาม สำหรับความสัมพันธ์ของ TIT และกำลังหลักเจาะจงของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Specific Core Power) มีรูปแบบดังภาพที่ 2 บริษัทออกแบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซในปัจจุบันสามารถพัฒนาเครื่องยนต์ให้ค่า TIT มีค่าอยู่ประมาณ 2,500 องศาฟาเรนไฮต์ หรือประมาณ 1,370 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม กังหันที่ถูกใช้ในเครื่องยนต์นั้นเป็นโลหะผสมที่มีการเคลือบผิวพิเศษก็ไม่สามารถทนต่อ TIT ที่สูงขึ้นได้ ส่งผลให้กังหันเสียหาย แตกหัก หรือผิดรูปไป เครื่องยนต์กังหันก๊าซจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นกังหันเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อน [2]



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของก๊าซที่เข้าเครื่องกังหัน และกำลังของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

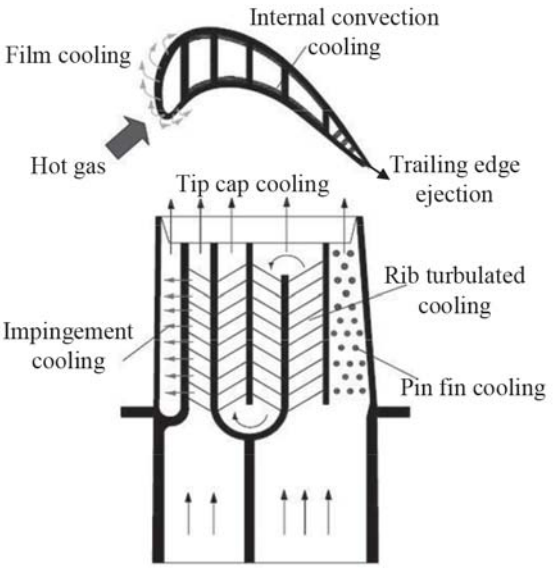
2. การแบ่งประเภทของการหล่อเย็นกังหัน

การหล่อเย็นกังหันนั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการรักษาอุณหภูมิของกังหันไว้ไม่ให้สูงเกินขีดจำกัดที่วัสดุสามารถทนได้ การแบ่งประเภทของการหล่อเย็นกังหันแบ่งได้หลายวิธี ถ้าแบ่งตามบริเวณที่ถูกหล่อเย็นจะแบ่งได้ 2 ส่วน คือ การหล่อเย็นภายในกังหัน (Turbine Blade Internal Cooling) และการหล่อเย็นภายนอกกังหัน (Turbine Blade External Cooling) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทตามชนิดของสารหล่อเย็น (Coolant) ได้คือ การใช้ของเหลวหล่อเย็น (Liquid Cooling) และการใช้อากาศหล่อเย็น (Air Cooling)

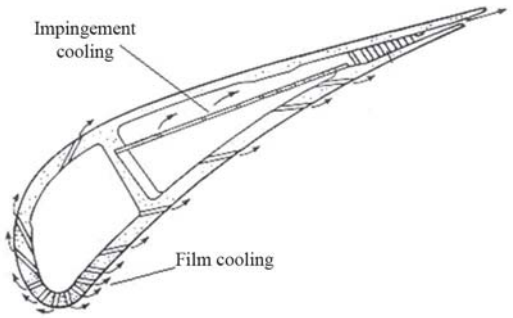
3. ประเภทการหล่อเย็นภายในกังหัน และการหล่อเย็นภายนอกกังหัน

การหล่อเย็นภายในกังหันมีหลักการ คือ จะผ่านสารหล่อเย็น ที่เป็นอากาศหรือของเหลวที่ใช้หล่อเย็นจากฐานของกังหันไปตามแนวช่องสารหล่อเย็นที่อยู่ภายในกังหัน แล้วไปปล่อยทิ้งที่ปลายกังหันดังภาพที่ 3 หน้าตัดของช่องสารหล่อเย็นนั้นอาจเป็นทรงสี่เหลี่ยม วงกลม วงรี รูปแบบใดก็ได้โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างของใบพัด การหล่อเย็นภายในกังหันนี้ใช้กลไกพาและนำความร้อนที่สะสมภายในกังหันไปทิ้งนั่นเอง [13]

สำหรับการหล่อเย็นภายนอกกังหันนั้นจะทำการลดอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของกังหันโดยตรง วิธีที่ได้รับความนิยมในการการหล่อเย็นภายนอก คือ การหล่อเย็นแบบฟิล์ม (Film Cooling) ดังภาพที่ 4 [7]



ภาพที่ 3 การหล่อเย็นภายในกังหัน



ภาพที่ 4 การหล่อเย็นภายนอกกังหัน

4. การใช้ของเหลวและอากาศหล่อเย็นกังหัน

การใช้ของเหลวในการหล่อเย็นกังหันนั้นมักจะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น แต่งานบางชนิดไม่สามารถใช้น้ำได้จึงต้องใช้ของเหลวชนิดอื่น ข้อได้เปรียบของการใช้ของเหลวหล่อเย็น คือ มีประสิทธิภาพในการหล่อเย็นดีกว่าอากาศ อย่างไรก็ตามในบางครั้งการหล่อเย็นมากเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวใบพัดได้ ข้อควรระวังเมื่อมีการใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น คือ เมื่อน้ำเดือดเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้ว การนำไอน้ำกลับมาใช้ใหม่เป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้น เครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับเครื่องบินจึงไม่นิยมใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น แต่สามารถพบการใช้น้ำหล่อเย็นในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า และในบางครั้งการปนเปื้อนของน้ำจะทำให้เกิดการกัดกร่อนในกังหันส่งผลให้เกิดความเสียหายได้

การใช้อากาศหล่อเย็น มักจะใช้อากาศบางส่วนที่ได้จากเครื่องอัดมาทำการแยกเข้ากังหันโดยตรงไม่ผ่านห้องเผาไหม้ การใช้อากาศหล่อเย็นมีความได้เปรียบเรื่องของระบบที่ไม่ซับซ้อนและการดูแลรักษาที่ง่ายกว่าการใช้ของเหลวหล่อเย็น แต่ความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนนั้นจะต่ำกว่าน้ำ

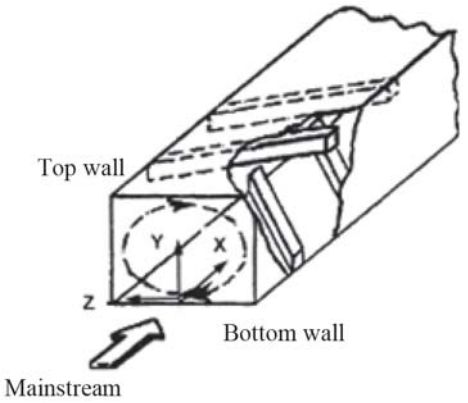
5. วิธีหล่อเย็นกังหัน

วิธีที่ใช้หล่อเย็นกังหันนั้นมีหลายแบบ แต่ระบบหล่อเย็นกังหันที่เป็นที่นิยมมี 2 กลุ่ม คือ การหล่อเย็นแบบการพา (Convection Cooling) และการหล่อเย็นแบบฟิล์ม (Film Cooling)

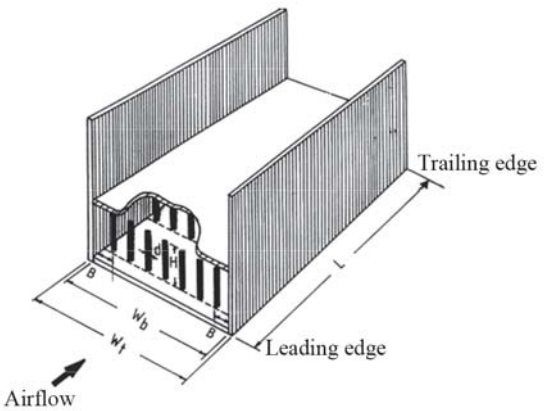
5.1 การหล่อเย็นแบบการพา

วิธีนี้มีหลักการทำงานโดยใช้ให้สารหล่อเย็นหรืออากาศจากเครื่องอัดไหลผ่านช่องภายในกังหันที่ถูกเตรียมไว้ สารหล่อเย็นจะพาความร้อนภายในใบพัดออกไปทิ้งที่ทางออกที่อยู่บริเวณปลายของกังหัน วิธีนี้สามารถลดอุณหภูมิภายในกังหันได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม หล่อเย็นแบบการพาโดยให้อากาศไหลภายในช่องของกังหันอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอความร้อนสามารถสะสมส่งผลให้อุณหภูมิภายในกังหันสูงขึ้นมาได้ นักวิจัยจึงได้คิดและออกแบบเทคนิค เช่น การติดครีบ (Rib Turbulators) การติดพิน (Pin) ดังภาพที่ 5 และ 6 ตามลำดับ [12], [10]



ภาพที่ 5 การติดครีบภายในช่องของกังหัน



ภาพที่ 6 พินภายในช่องของกังหัน

การติดครีบภายในช่องของกังหันนั้นช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ได้มีการทดลองศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ของครีบที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนภายในช่องรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีค่าเรย์โนลด์ระหว่าง 10,000 ถึง 60,000 โดยรูปแบบการเรียงตัวของครีบนั้นมีมุมปะทะ (Angle of Attack) ได้แก่ 30, 45, 60 และ 90 องศา ผลการเปรียบเทียบไหลภายในช่องที่มีและไม่มีครีบที่ค่าเรย์โนลด์ 30,000 พบว่า ช่องที่มีครีบแสดงค่านัสเซลส์เฉลี่ย (Average Nusselt Number) สูงขึ้นประมาณ 70% โดยจะให้ค่าสูงสุดที่มุมปะทะเท่ากับ 60 องศา อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าความเสียดทานภายในช่องก็เพิ่มตามด้วย [3]

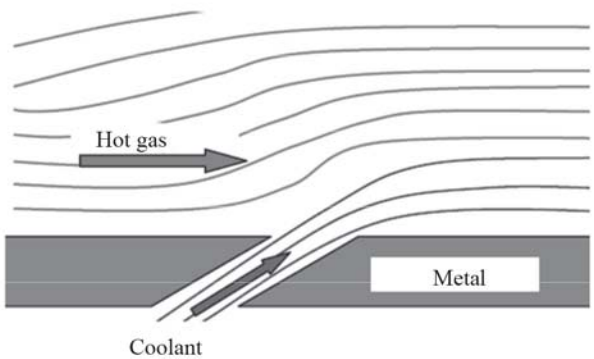
ต่อมามีการหล่อเย็นโดยใช้พิน สำหรับพินที่ใช้ในงานหล่อเย็นกังหันนั้นมีลักษณะเป็นปุ่มเล็ก ๆ ยื่นออกมาจากพื้นผิวของช่องของกังหัน โดยพินจะเพิ่มการผสมของสารหล่อเย็นภายในช่องของกังหันและบังคับให้สารหล่อเย็นเกิดการไหลวน (Wake) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนและความสามารถในการหล่อเย็นภายในกังหันสูงขึ้นอีกด้วย

พินที่ใช้ในกังหันนั้นมักถูกติดตั้งไว้ในส่วนขอบด้านหลัง (Trailing Edge) ของกังหันดังแสดงในภาพที่ 3 ในบริเวณนี้ช่องของสารหล่อเย็นมีลักษณะเล็กและแคบ การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อเย็นชนิดอื่นนั้นทำได้ยาก การติดตั้งพินนั้นไม่นิยมติดพินเพียงตัวเดียว แต่จะติดตั้งเป็นชุด (Array) โดยรูปแบบของการจัดเรียงนั้นขึ้นอยู่กับมิติของช่องภายในกังหัน รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้อยู่มี 2 แบบ คือ แบบแถวเรียง (Inline) และแบบเหลื่อม (Staggered) [6]

เนื่องจากพินที่ใช้ในกังหันมีขนาดเล็กเพราะช่องของขอบด้านหลังมีขนาดเล็ก การศึกษาโครงสร้างของพินที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็น ในการทดลองศึกษาโครงสร้างของพิน จำนวน 3 แบบ ได้แก่ ทรงครึ่งวงกลม ทรงสี่เหลี่ยม และทรงเพชร พบว่า เมื่อนำมาเรียงตัวแบบแถวเรียงและเหลื่อมกันแล้วนั้น การเรียงตัวแบบเหลื่อมให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนที่ดีกว่าแบบแถวเรียงอย่างเห็นได้ชัด และรูปทรงที่ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนที่ดีที่สุด คือ รูปทรงเพชร แต่เมื่อมีการติดตั้งพินลงไปแล้ว พบว่า ข้อเสียที่ตามมา คือ ความเสียดทานที่สูงขึ้นอย่างมาก โดยรูปทรงเพชรมีความเสียดทานสูงที่สุดสอดคล้องกับค่าการถ่ายโอนความร้อนที่มีค่าสูงสุดด้วย [1]

5.2 การหล่อเย็นแบบฟิล์ม

การหล่อเย็นด้วยวิธีนี้มีหลักการทำงาน คือ เมื่อผิวของวัตถุสัมผัสกับก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง สารหล่อเย็นจะถูกฉีดออกมาจากช่องขนาดเล็กเคลือบผิวของวัตถุ เป็นชั้นบาง ๆ เรียกว่า ฟิล์ม ดังภาพที่ 7 โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้สามารถป้องกันผิววัตถุไม่ให้เกิดความเสียหายจากความร้อนได้ เปรียบได้กับมีชั้นฉนวนป้องกันความร้อนชั่วคราวเพิ่มขึ้นมา [9]



ภาพที่ 7 หลักการทำงานของการหล่อเย็นแบบฟิล์ม

การวิเคราะห์ความสามารถในการหล่อเย็นแบบฟิล์ม นิยมใช้ค่าประสิทธิผลของการหล่อเย็นแบบฟิล์ม (η) ในการพิจารณาและสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\eta = \frac{T_g - T_{aw}}{T_g - T_c} \tag{1}$$

โดย T_{aw} คือ อุณหภูมิอะเดียแบติกที่ผิว ส่วน T_c และ T_g คือ ค่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นและก๊าซร้อนตามลำดับ อย่างไรก็ดี การหล่อเย็นแบบฟิล์มนั้นสามารถป้องกันวัตถุได้เพียงบางส่วนเท่านั้น กล่าวคือ เมื่อการไหลของสารหล่อเย็นและก๊าซร้อนเป็นแบบปั่นป่วน หลังจากสารหล่อเย็นไหลออกไปได้ระยะ ๆ หนึ่งการผสมระหว่างสารหล่อเย็นกับก๊าซร้อนจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิของฟิล์มมีค่าสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับก๊าซร้อน ค่าประสิทธิผลของการหล่อเย็นแบบฟิล์มจะมีค่าลดลง

ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซได้นำการหล่อเย็นแบบฟิล์มมาใช้เพื่อป้องกันความเสียหายในหลายส่วน เช่น กังหัน ฐานของกังหัน โดยทำการติดตั้งรูสำหรับให้อากาศที่ถูกอัดจากเครื่องอัดไหลออกมาเคลือบที่พื้นผิว สำหรับรูที่ถูกติดตั้งที่เครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้น นิยมติดตั้งเป็นชุดเพื่อครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการหล่อเย็น

ในปัจจุบันนักวิจัยได้พยายามพัฒนาให้การหล่อเย็นแบบฟิล์มสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีประสิทธิภาพสูงและความน่าเชื่อถือมากขึ้นเพราะส่วนผิวด้านนอกของกังหันนั้นสัมผัสก๊าซร้อนโดยตรง เมื่อความเสียหายเกิดขึ้นกับกังหันแล้วจะไม่สามารถซ่อมแซมได้ ต้องทำการเปลี่ยนใหม่เท่านั้น ส่งผลให้ค่าใช่จ่ายในการดูแลรักษาสูงขึ้นตาม การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการหล่อเย็นแบบฟิล์มนอกจากช่วยให้การถ่ายโอนความร้อนให้ดีขึ้นแล้วยังช่วยยืดอายุกังหันให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นอีกด้วย การศึกษาการหล่อเย็นแบบฟิล์มมีด้วยกันหลายส่วน เช่น การศึกษาลักษณะทางกายภาพของรูที่ปล่อยสารหล่อเย็น การศึกษามุมของฉีดสารหล่อเย็น หรือศึกษาอัตราส่วนการเป่า (Blowing Ratio) ของการหล่อเย็นแบบฟิล์ม เป็นต้น

เนื่องจากข้อจำกัดด้านมิติของตัวกังหัน จึงมีการเพิ่มประสิทธิภาพของสารหล่อเย็นโดยการฉีดละอองน้ำไปผสมกับอากาศเป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิผลของการหล่อเย็นแบบฟิล์ม การทดลอง พบว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของละอองน้ำที่ผสมกับอากาศสูงขึ้นจาก 10% เป็น 20% แล้วความสามารถในการหล่อเย็นสูงขึ้นจาก 11% เป็น 21% และเมื่อพิจารณาขนาดของละอองน้ำ พบว่า ละอองน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ไมโครเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพในการหล่อเย็นดีกว่าละอองน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร ถึง 10-20% [11]

นอกจากนี้ การหล่อเย็นแบบฟิล์มบนกังหันในเครื่องยนต์ก๊าซ ยังพบจุดที่น่าสนใจ คือ เมื่ออยู่ในสภาวะการทำงานจริงนั้นกังหันจะหมุนอยู่ตลอดเวลา การหมุนนี้ทำให้รูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นที่พ่นออกมานั้นมีการเบนตัวผิดรูปไปเนื่องจากแรงหนีศูนย์ (Centrifugal Force) ลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้ประสิทธิผลของการถ่ายโอนความร้อนในแต่ละตำแหน่งบนกังหันมีการเปลี่ยนแปลง ได้มีการทดลองเพื่อดูผลกระทบของการหมุนต่อค่าประสิทธิผลของการหล่อเย็นแบบฟิล์ม พบว่า ที่ด้านความดันสูง (Pressure Side) และด้านความดันต่ำ (Suction Side) ของกังหัน เมื่อค่าความเร็วรอบสูงขึ้น ค่าประสิทธิผลของการหล่อเย็นแบบฟิล์มจะมีค่าไม่แน่นอนอาจจะมากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับช่วงของอัตราส่วนการเป่าของสารหล่อเย็นและก๊าซร้อน [5], [14]

ต่อมาเมื่อพิจารณาโครงสร้างของกังหัน พบว่า มีลักษณะเป็นส่วนเว้า (Concave) ที่ด้านความดันสูงและส่วนนูน (Convex) ที่ด้านความดันต่ำ ลักษณะของโครงสร้างทั้งเว้าและนูนนั้น มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลของทั้งสารหล่อเย็นและก๊าซร้อน จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผิวของกังหัน 3 ส่วน คือ ผิวราบ ผิวเว้า และผิวนูน เมื่ออัตราส่วนการเป่าต่ำผิวนูนให้ค่าประสิทธิผลที่สูงกว่าผิวทั้งสองแบบ แต่เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนการเป่าให้สูงขึ้น พบว่า ผิวเว้าให้ค่าประสิทธิผลที่สูงกว่าทั้งสองแบบอย่างชัดเจน [4], [8]

6. บทสรุป

เมื่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซถูกพัฒนาให้สูงขึ้น ปัญหาที่ตามมาคืออุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกมาจากห้องเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นตาม จนกังหันไม่สามารถทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นได้ การหล่อเย็นกังหันได้ถูกนำมาใช้เพื่อลดความร้อนที่กังหัน การหล่อเย็นไม่สามารถใช้เพียงหนึ่งวิธีในการลดอุณหภูมิได้ จำเป็นต้องใช้หลายวิธีร่วมกัน เนื่องจากต้องทำการหล่อเย็นในหลายจุดของกังหัน ด้านการพัฒนาวิธีการหล่อเย็นในปัจจุบันถูกศึกษาและวิจัยมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องยนต์กังหันก๊าซรุ่นใหม่ถูกพัฒนาจนมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์กังหันก๊าซยุคเริ่มต้นมาก ด้วยเหตุนี้วิศวกรจึงสามารถออกแบบและกำหนดอุณหภูมิของก๊าซที่เข้าเครื่องกังหันให้มีค่าสูงขึ้นหลายเท่าได้

อย่างไรก็ตาม พบว่า ผลเสียที่ตามมา คือ เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องยนต์สูงขึ้น ค่าความเสียดทานภายในระบบสามารถเพิ่มตามได้เช่นเดียวกัน ดังนั้น วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นในการหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่พอเหมาะ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับใบกังหันก๊าซ

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำที่ดีจากจาก Associate Professor Dr. Xianchang Li จาก Lamar University, Texas, USA

เอกสารอ้างอิง

[1] M.K. Chyu, Y.C. Hsing and V. Natarajan, “Convective heat transfer of cubic fin arrays in a narrow channel,” *Journal of Turbomachinery,* **vol.** 120, **no.** 2, pp. 362-367, January 1998.

[2] J.C. Han, S. Dutta and S. Ekkad, *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology.* 1st ed. New York: Taylor & Francis, 2000.

[3] J.C. Han and J.S. Park, “Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators,” *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **vol.** 31, **no.** 1, pp. 183-195, January 1988.

[4] I. Koc, C. Parmakszoglu and M. Cakan, “Numerical investigation of film cooling effectiveness on the curved surface,” *Energy Conversion and Management,* **vol.** 47, **no.** 9, pp. 1231-1246, June 2006.

[5] G. Li, J. Zhu, H. Deng, Z. Tao and H. Li, “Experimental investigation of rotating film cooling performance in a low speed 1.5-stage turbine,” *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **vol.** 61, pp. 18-27, June 2013.

[6] M.E. Lyall, A.A. Thrift, K.A., Thole, and A. Kohli, “Heat transfer from low aspect ratio pin fins,” *Journal of Turbomachinery,* **vol.** 133, **no.** 1, pp. 011001-1-10, September 2010.

[7] M. Oldfield, "Lecture in Keep it Cool! 38 Years of Gas-Turbine Research," *SOUE News,* **no.** 7, pp. 33-37, 2008.

[8] S.G. Schwarz and R.J. Goldstein, "The two-dimensional behavior of film cooling jets on concave surfaces," *Journal of Turbomachinery,* **vol.** 111, **no.** 2, pp. 124-126, April 1989.

[9] G. Subbuswamy and X.C. Li, "Simulation of Backward Film Cooling at Gas Turbine Operating Conditions with and without Mist Injection," presented at ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Denver, Colorado, USA, 2011.

[10] M. Tahat, Z.H. Kodah, B.A. Jarrah, and S.D. Probert, "Heat transfers from pin-fin arrays experiencing forced convection," *Applied Energy,* **vol.** 67, **no.** 4, pp. 419-442, December 2000.

[11] T. Wang and X.C. Li, "Mist film cooling simulation at gas turbine operating conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **vol.** 51, **no.** 21-22, pp. 5305-5317, October 2008.

[12] S.Y. Won, G. I. Mahmood and P.M. Ligrani, "Fiow structure and local Nusselt number variations in a channel with angled crossed-rib turbulators," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **vol.** 46, **no.** 17, pp. 3153-3166, August 2003.

[13] G. Xie and B. Sunden, "Numerical predictions of augmented heat transfer of an internal blade tip-wall by hemispherical dimples," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **vol.** 53, **no.** 25, pp. 5639-5650, December 2010.

[14] T. Zhi, X. Yang, S. Ding, G. Xu, H. Wu, H. Deng and X. Luo, "Experimental study of rotation effect on film cooling over the fiat wall with a single hole," *Experimental Thermal and Fiuid Science,* **vol.** 32, **no.** 5, pp. 1081-1089, April 2008.

Dr. Suabsakul Gururatana received his Bachelor and Master of Engineering in Mechanical Engineering from Kasetsart University in 2004 and 2006. In 2011 he earned his Doctor of Engineering in Mechanical Engineering from Lamar University, Beaumont, Texas, USA. He has been working as a lecturerer at Faculty of Engineering at Sriracha Campus, Kasetsart University since 2006. His major research interests currently focus on the improvement of nonlinear turbulence models for computational fluid dynamicsheat transfer enhancement for electronics cooling, and fluid structure interaction.