

การเพิ่มค่าประสิทธิผลเทคนิคฟิล์มหล่อเย็นที่หางใบพัดกังหันก๊าซด้วยหลุมแบบกึ่งทรงกลม Enhancing Trailing Edge Cutback Film Cooling Effectiveness by Semi-Sphere-Shaped Dimple

<u>พงษกร ถาวสถิตย์1</u>, จตุพล แย้มสกุล¹, วิริยะ บริสุทธิ์¹, Abdul Ahad Narejo², วรางค์รัตน์ จันทสาโร¹* และเอกชัย จันทสาโร²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร 10900 ²Department of Mechanical and Process Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS), King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), 1518 Pracharat 1 Rd., Wongswang, Bangsue, Bankok

10800

*ติดต่อ: fengvrj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การหล่อเย็นที่บริเวณหางของใบพัดกังหันก๊าซนั้นไม่สามารถสร้างช่องทางการไหลของระบบหล่อเย็นภายในแบบ ที่ซับซ้อนได้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ใบพัดกังหันก๊าซมีความบาง พื้นที่แคบและต้องคำนึงถึงความทนทานของใบพัดกังหัน เทคนิคฟิล์มหล่อเย็นจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ที่บริเวณหางของใบพัดกังหันก๊าซขึ้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาค่า ประสิทธิผลของการหล่อเย็นและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการหล่อเย็นด้วยเทคนิคฟิล์มหล่อเย็น โดยสร้าง พื้นผิวบริเวณหางของใบพัดกังหันที่มีฟิล์มหล่อเย็นปกคลุมอยู่ ให้มีลักษณะเป็นหลุมซึ่งมีรูปทรงแบบกึ่งทรงกลมที่มี อัตราส่วนความรัศมีต่อความลึก (R/D) ที่แตกต่างกัน (1.0, 1.5, 2.5) และมีการเรียงตัวในลักษณะตามแนวยาว ซึ่งจะ ทำการศึกษาโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้โมเดลความปั่นป่วน SST k-**0** โดยทำการศึกษาสภาวะที่มีอัตราส่วน การเป่าที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0

คำหลัก: เครื่องยนต์กังหันก๊าซ, การหล่อเย็นใบพัดกังหัน, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Abstract

Cooling at trailing edge of gas turbine blade can't build complex internal cooling passage because of its thin shape, geometry is narrow passage and have to meditate for structural strength. Therefore film cooling was applied to use at trailing edge of gas turbine blade. In this research aim at study, film cooling effectiveness and heat transfer coefficient of film cooling technique. The trailing edge cutback surface that covered by film cooling was roughened by semi-sphere-shaped dimples. The difference radius to depth (R/D) ratio (1.0, 1.5, 2.5) of the dimples surface with in-line arrangements were studied by computational fluid dynamics with turbulent model SST k- \mathbf{O} for blowing ratio of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0

Keywords: Gas Turbine Engine, Turbine Blade Cooling, Computational Fluid Dynamics

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31



4 - 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก



รูปที่ 1 ภาพแสดงเทคนิคการหล่อเย็นด้วยฟิล์มหล่อเย็นที่ บริเวณหางของใบพัดกังหันในเครื่องยนต์กังหัน ก๊าซ [10]

จากการศึกษางานวิจัยเทคนิคการหล่อเย็นในใบพัด กังหันก๊าซในผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปใจความ สำคัญได้ดังนี้ Taslim และคณะ [1] ทำการทดลองหา ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับฟิล์มหล่อเย็นจากช่องการไหลของ อากาศหล่อเย็นที่บริเวณหางของใบกังหัน โดยสังเกต ผลกระทบที่มาจาก ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของ อากาศหล่อเย็นต่ออากาศร้อน ความกว้างของรูเจาะ ความหนาของปากรูฉีด (Lip) และองศาการฉีดของฟิล์ม หล่อเย็น พบว่า ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของอากาศ หล่อเย็นต่ออากาศร้อน และความกว้างของรูเจาะ มี ผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อ เย็น และองศาการฉีดของอากาศหล่อเย็นมีความ เหมาะสมที่สุดที่ 8.5 องศา โดยความหนาของปากรูฉีด เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อค่าประสิทธิผลของ ฟิล์มหล่อเย็นคือ เมื่อความหนาของปากรูฉีดมีขนาดมาก ขึ้นส่งผลทำให้ค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นลดลง Cunha และ Chyu [2] ได้ทำการศึกษารูปแบบการหล่อ เย็นที่บริเวณหางของใบพัดกังหันด้วยกัน 4 รูปแบบและ พบว่ารูปแบบที่มีการออกแบบด้วยพื้นผิว Cutback

1. บทนำ

เครื่องยนต์กังหันก๊าซมีบทบาทสำคัญในหลาย อุตสาหกรรม และเป็นหนึ่งในเครื่องยนต์หลักที่ใช้ผลิต กระแสไฟฟ้าซึ่งมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึง ทำให้เครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นที่สนใจในการพัฒนาและ ออกแบบให้มีประสิทธิภาพและมีกำลังการผลิตที่สูงขึ้น ตามหลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซซึ่งเป็นไป ตามวัฏจักรเบรย์ตัน การได้มาซึ่งกำลังการผลิตและ ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของเครื่องยนต์ ส่งผลให้ใบพัดกังหัน ต้องรองรับอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากก๊าซร้อนที่ออกจากห้อง เผาไหม้ของเครื่องยนต์ซึ่งเกินจุดหลอมเหลวของวัสดุของ ใบพัดกังหันจึงทำให้เกิดความเสียหายขึ้นจากความเค้น เนื่องจากความร้อน ด้วยปัญหาดังกล่าวจึงทำให้เกิดการ พัฒนาระบบหล่อเย็นของใบพัดกังหันขึ้น ซึ่งที่บริเวณหาง ของใบพัดกังหันเป็นหนึ่งในบริเวณที่ยากต่อการควบคุม การหล่อเย็นของพื้นผิววัสดุให้มีประสิทธิภาพ เนื่องจาก เป็นบริเวณที่มีพื้นที่แคบและเป็นช่วงที่ความหนาของ ใบพัดบางจึงต้องคำนึงถึงความทนทานของวัสดุด้วย ใน ปัจจุบันมีการออกแบบและพัฒนารูปแบบการหล่อเย็น ของใบพัดกังหันที่บริเวณหาง โดยใช้เทคนิคฟิล์มหล่อเย็น (Film Cooling) ซึ่งอาศัยอากาศหล่อเย็นที่มาจากช่อง ทางการหล่อเย็นภายในจากส่วนกลางของใบพัด ฉีดฟิล์ม หล่อเย็นผ่านรูเจาะที่บริเวณหางของใบพัดเพื่อปกคลุม พื้นผิวของวัสดุที่มีการตัดฝั่งความดัน ซึ่งเรียกว่าพื้นผิว Cutback (รูปที่ 1) โดยผลจากฟิล์มหล่อเย็นที่ปกคลุม พื้นผิวของใบพัดกังหัน ทำให้พื้นผิวของใบพัดกังหันไม่ สัมผัสกับก๊าซร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยตรงอีกทั้งยังช่วยใน การระบายความร้อนที่บริเวณหางฝั่งความดันต่ำของ ใบพัดกังหันด้วย (Suction Side)



ME-NETT 31^s

V พบว่าหลุมรูปทรง V ที่ไม่มี Ribs ให้การแลกเปลี่ยน ความร้อนได้น้อยกว่าหลุมรูปทรงแบบหยดน้ำ Julia และ คณะ [8] ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับ รปแบบของ Land ที่บริเวณหางของใบพัดด้วยกัน 3 รูปแบบซึ่งพบว่า Land ที่ทำมุม 90 องศา มีผลทำให้ฟิล์ม หล่อเย็นสามารถปกคลุมได้ทั่วบริเวณหางของใบพัดกังหัน โดยที่ค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นเฉลี่ยแล้วมีค่ามาก ที่สุด เมื่อเทียบกับ Land ที่ทำมุม 5 องศา และ 7.5 องศา Yano และคณะ [9] ทำการศึกษาผลกระทบของค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นโดยการหมุนปรับองศาการ เรียงตัวของหลุมรูปทรงหยดน้ำ ที่ 0 ถึง 75 องศา โดย ้ควบคุมจำนวนของหลุมต่อพื้นที่เท่ากัน พบว่าหลุมที่มีการ ปรับองศาการเรียงตัวที่ 30 องศา ให้ค่า Net Heat Flux Reduction (NHFR) ที่สูงที่สุดและไม่ส่งผลทำให้ค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นถูกทำลายไป Akira และ คณะ [10] ทดลองผลกระทบของค่าประสิทธิผลของฟิล์ม หล่อเย็นจากการเรียงตัวของหลุมรูปทรงหยดน้ำที่บริเวณ พื้นผิว Cutback ที่หางใบพัดกังหัน โดยใช้เทคนิค Transient Infrared Thermography เพื่อสังเกตการนำ ความร้อนที่ผนังของวัสดุ พบว่าหลุมที่มีการเรียงตัวแบบ ตามแนวยาวที่มีการปรับองศาการหมุนของหลุมรูปทาง หยดน้ำที่ 30 องศา ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ ร้อนและค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นสูงกว่าการเรียง ตัวแบบสลับฟันปลา จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัย เบื้องต้นยังไม่มีการพิจารณาค่าอัตราส่วนของรัศมีต่อ ความลึกของหลุมแบบรูปทรงหยดน้ำและรูปทรงกึ่งทรง ึกลม ที่พื้นผิว Cutback บริเวณหางของใบพัดกังหันว่ามี ผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิผลของ ฟิล์มหล่อเย็นอย่างไร งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษา ้ค่าประสิทธิผลของการหล่อเย็นและค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนของการหล่อเย็นด้วยเทคนิคฟิล์มหล่อ เย็น โดยสร้างพื้นผิวบริเวณหางของใบพัดกังหันที่มีฟิล์ม หล่อเย็นปกคลุมอยู่ ให้มีลักษณะเป็นหลุมซึ่งมีรูปทรงแบบ ้กึ่งทรงกลมที่มีอัตราส่วนความรัศมีต่อความลึกที่แตกต่าง

สามารถใช้ในการหล่อเย็นที่บริเวณหางของใบพัดได้ เหมาะสมที่สุด โดยที่โครงสร้างของใบพัดยังสามารถ รองรับการทำงานในสภาวะการทำงานจริงได้และยังเพิ่ม ข้อดีในเรื่องของหลักอากาศพลศาสตร์ด้วย Zhihong [3] วิจัยการหล่อเย็นโดยฟิล์มหล่อเย็นในพัดกังหันของ ้เครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยพบว่าความหนาของปากรูฉีด ที่ ช่องอากาศหล่อเย็นที่บริเวณหางของใบพัดกังหันส่งผลให้ ้ค่าประสิทธิของของฟิล์มหล่อเย็นมีค่าลดลงเมื่อความหนา ของปากรูฉีดมีค่ามากขึ้น Sumanta และ Fuguo [4] ทำ การทดลองและการจำลองการไหล เพื่อเปรียบเทียบการ แลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นในช่องการไหลแบบ สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหลุมด้วยกัน 4 รูปทรง ได้แก่ หลุมแบบ สามเหลี่ยม หลุมแบบสี่เหลี่ยม หลุมแบบทรงกลม และ หลุมแบบทรงหยดน้ำ พบว่าหลุมรูปทรงแบบทรงหยดน้ำ ้ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด Akira และคณะ [5] ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของค่าประสิทธิผล ของฟิล์มหล่อเย็นที่หางของใบพัดกังหันที่มีรูปแบบต่างกัน 4 รูปแบบโดยใช้เทคนิคการวัด Transient Infrared Thermography และพบว่า Land ที่บริเวณหางของ ใบพัดกังหันในรูปแบบพื้นฐานให้ค่าประสิทธิผลของฟิล์ม หล่อเย็นได้สูงกว่า Land ที่มีการปรับองศา และพื้นผิว Cutback ที่มีการสร้างผิวแบบหลุมให้ค่าประสิทธิผลของ ฟิล์มหล่อเย็นได้สูงกว่าการสร้างพื้นผิวที่มีสิ่งกีดขวางแบบ สีเหลี่ยม Sotomi และคณะ [6] ทำการศึกษาผลกระทบ ของฟิล์มหล่อเย็นจากรูปทรง และการเรียงตัวของหลุมบน บริเวณพื้นผิวของ Cutback ที่บริเวณหางของใบพัดกังหัน พบว่า ที่การเรียงตัวของหลุมที่ไม่มีการปรับมุมองศาการ เรียงตัวของหลุม พบว่า หลุมแบบทรงกลมให้ค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นทั้งหมดมากกว่าแบบทรง หยดน้ำ แต่เมื่อทำการทดลองโดยการปรับมุมการเรียงตัว ของหลุมแบบทรงหยดน้ำขึ้น ค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อ เย็นทั้งหมดที่ได้มีค่ามากว่าทั้งสองแบบข้างต้น Jordan และ Wright [7] ทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ เกิดขึ้นในช่องการไหลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีหลุมรูปทรง



กัน (1.0, 1.5, 2.5) ซึ่งมีการเรียงตัวในลักษณะตามแนว ยาว และมีการปรับองศาการหมุนที่ 30 องศา โดย เปรียบเทียบกับหลุมที่มีอัตราส่วนรัศมีต่อความลึกที่ 2.22 ของ Akira และคณะ [10] (รูปที่ 2) ซึ่งจะทำการศึกษา โดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้โมเดล ความปั่นป่วน SST k-**@** โดยทำการศึกษาสภาวะที่ อัตราส่วนการเป่าที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0





(१)

2H



(ค)

รูปที่ 2 แสดงการให้ขนาดของหลุมแบบกึ่งทรงกลม (ก) ที่ รัศมีต่อความลึกเท่ากับ 1 (ข) รัศมีต่อความลึก เท่ากับ 1.5 (ค) รัศมีต่อความลึกเท่ากับ 2.22 จาก Akira และคณะ [10] (ง) รัศมีต่อความลึกเท่ากับ 2.5

รายละเอียดการจำลอง ลักษณะของปัญหา

ลักษณะของขอบเขตการคำนวณ (Domain) เพื่อจำลองการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ บริเวณหางของใบพัดกังหันและมีการสร้างหลุมบนพื้นผิว Cutback ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างโดยควบคุมขนาดและ สัดส่วนของขอบเขตการคำนวณตามการทดลองของ Akira และคณะ [10] โดยได้ทำการแบ่งขอบเขตการ ้คำนวณเพื่อง่ายต่อการสร้างกริด (Mesh) ออกเป็น 4 ส่วนด้วยกัน คือ อากาศหลัก (Main Flow) อากาศเย็น (Cooling Flow) ช่วงพื้นผิว Cutback ที่มีการสร้างหลุม ที่อัตราส่วนรัศมีต่อความลึกที่ต่างกันเพื่อทำการศึกษา และแบบจำลองที่หางของใบพัดกังหันในส่วนของแข็ง โดยมีขนาดความสูงของทางเข้าอากาศเย็น H (10 mm) ความสูงของทางเข้าอากาศหลัก 4H ไหลทำมุมกับแนว ระดับ 10 องศา ความหนาของปากรูฉีด (Lip) H ความสูง ของรูฉีด (Slot) H โดยมี Land ทำมุม 5 องศากับแนว ระดับและมีความกว้าง 0.9 H ดังแสดงในรูปที่ 3







(ก) ภาพร่างมุมมองด้านข้างของขอบเขตการ
คำนวณ (ข) ภาพร่างของขอบเขตการคำนวณ
มุมมองด้านบน (ค) ขอบเขตการคำนวณของ
อากาศหลัก (ง) ขอบเขตการคำนวณแบบจำลอง
บริเวณหางของใบพัดกังหัน (จ) ขอบเขตการ
คำนวณบริเวณ Cutback (ฉ) ขอบเขตการ
คำนวณของอากาศเย็น

การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในงานนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มใน ANSYS FLUENT โดยใช้การคำนวณแบบ Steady-State Pressure Based Solver และใช้ COUPLED Algorithm สำหรับ Pressure-Velocity Coupling และใช้แบบจำลองความ ปั่นป่วน SST k-**()** โดยในบริเวณใกล้ผนังซึ่งมีการไหล ในช่วง Viscous Sublayer ได้ใช้ค่า y⁺ = 0.8 สำหรับ First Grid Point โดยจำลองความเร็วในการไหลเข้าของ อากาศหลักที่ทำให้ค่าเรย์โนลด์ (Re_H) ที่ขึ้นกับ 2 เท่าของ ความสูงของทางเข้าอากาศหลัก (8H) เท่ากับ 25,000 โดยพิจารณาเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ และเป็นการ ถ่ายเทความร้อนแบบ Conjugate Heat Transfer อุณหภูมิของอากาศหลักไหลเข้าเท่ากับ 335.15 K ที่ ความดันเท่ากับ 102,008.8 Pa อุณหภูมิของอากาศเย็น ไหลเข้า 323.15 K โดยที่ความดันปรับเปลี่ยนไปตาม ความเร็วของอากาศเย็นที่ไหลเข้าเพื่อให้ได้ อัตราส่วนการ เป่า (Blowing Ratio) ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ซึ่งมี ความดันขาออกเท่ากับ 101989.91 Pa และมีความเร็ว การไหลที่ผนังเท่ากับ 0 (No Slip Condition) ในส่วน ของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของฟิล์ม หล่อเย็น ได้ทำการปรับค่าอัตราส่วนรัศมีต่อความลึก (R/D) ของหลุมแบบกึ่งทรงกลมที่ค่าต่างกัน 3 ค่าคือ 1, 1.5 และ 2.5 โดยใช้หลุมที่มี อัตราส่วนรัศมีต่อความลึกที่ 2.22 ในงานวิจัยของ Akira และคณะ [10] นำมาใช่ใน การเปรียบเทียบผลการจำลอง

2.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้พิจารณาให้เป็นสภาวะการไหลแบบอัด ตัวได้คือ ความหนาแน่นของของไหลขึ้นอยู่กับความดัน (P) และอุณหภูมิ (T) ซึ่งได้จากกฎของก๊าซในอุดมคติ

$$\rho = \frac{P}{RT}$$
(1)

เมื่อ R เป็นค่าคงตัวสากลของก๊าซ

การได้มาซึ่งค่าความดันเพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต มาจากสมการของ Bernoulli โดยไม่คิดพลังงานศักย์คือ ผลต่างความดันทางเข้า (P_i) กับความดันขาออก (P_o) เท่ากับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้จะทำการแยก คำนวณทีละส่วนในการกำหนดเนื่องไขขอบเขตทางเข้า เป็นของอากาศหลักและอากาศเย็นซึ่งกำหนดเป็น ค่า ความดันทางเข้า (Pressure Inlet)

$$P_i - P_o = \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{2}$$

สำหรับกรณีสภาวะการจำลองที่อัตราส่วนการเป่า (*M*) ที่แตกต่างกันค่าอัตราส่วนการเป่าคำนวณได้จาก อัตราส่วนของอัตราการไหลเข้าของมวลอากาศเย็นต่อ พื้นที่ต่ออัตราการไหลเข้าของมวลอากาศร้อนต่อพื้นที่

$$M = \frac{\rho_c v_c}{\rho_h v_h} \tag{3}$$

จากสมการที่ (1) ถึง (3) ทำให้การได้มาซึ่งสมการ การคำนวณหาความหนาแน่นของอากาศเย็นในแต่ละ สภาวะของการจำลองได้ดังนี้

$$\rho_{c} = \frac{P_{o} + \sqrt{P_{o}^{2} + 2RT_{c}(\rho_{h}\nu_{h}M)^{2}}}{2RT_{c}}$$
(4)

การประเมินค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็น (η)

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31

4 – 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก

CST – 28

คำนวณมาจากผลต่างของอุณหภูมิอากาศหลัก (T_h) กับ อุณหภูมิของผนังวัสดุ (T_w) ต่อผลต่างของอุณหภูมิ อากาศหลัก (T_h) กับอุณหภูมิของอากาศเย็น (T_c)

$$\eta = \frac{T_h - T_w}{T_h - T_c}$$
(6)

2.3 การสร้างกริดการคำนวณ

จากการแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็น 4 ส่วนทำ เพื่อให้สะดวกต่อการสร้างกริดการคำนวณเนื่องจาก รูปร่างของขอบเขตการคำนวณมีความซับซ้อนจึงได้ทำ การสร้างกริดในรูปแบบ Non-Conformal ซึ่งมีความ หนาของกริดชั้นแรกบริเวณชั้นชิดผิวที่ 0.01 mm โดยทำ การสร้างกริดในส่วนของอากาศหลักและอากาศเย็นโดย ใช้วิธี Multi Zone และในส่วนอากาศไหลผ่านพื้นผิว Cutback ถูกควบคุมโดยฟังก์ชัน Proximity and Curvature โดยจำนวนของเอลิเมนต์โดยรวมอยู่ที่ 7,200,00 เอลิเมนต์ ในทั้ง 4 รูปแบบของหลุม ดังที่แสดง ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กริดการคำนวณในขอบเขตการคำนวณ 4 ส่วน โดยสีส้มแสดงส่วนของอากาศหลัก สีฟ้าส่วนของ

อากาศเย็น สีเขียวส่วนบริเวณพื้นผิว Cutback และสีเทาเป็นส่วนของวัสดุ

3. ผลการจำลองและการวิเคราะห์ 3.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับงานวิจัยอ้างอิง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการจำลอง ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าประสิทธิผล ของฟิล์มหล่อเย็นกับผลการทดลองของ Akira และ คณะ [10] บนพื้นผิว Cutback ที่มีหลุมอัตราส่วนรัศมีต่อ ความลึกที่ 2.22 ภายใต้สภาวะเดียวกันที่อัตราส่วนการ เป่าเท่ากับ 1.0 ดังรูปที่ 5 พบว่าผลการจำลองมีค่าเฉลี่ย ของเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 9.03% และ วิธีการจำลองในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการ ทดลอง ซึ่งสามารถนำมาใช้ทำนายแนวโน้มของค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นได้



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็น กับผลการทดลอง ที่สภาวะอัตราส่วนการเป่า เท่ากับ 1 และอัตราส่วนรัศมีต่อความลึกของหลุม 2.2

3.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของหลุมที่มีอัตราส่วนรัศมี ต่อความลึกที่ต่างกัน

ค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นที่อัตราส่วนรัศมีต่อ ความลึกที่ต่างกันโดยการจำลองที่อัตราส่วนการเป่าที่ เท่ากับ 1 ดังที่แสดงรูปที่ 6 พบว่าหลุมที่สร้างบนพื้นผิว Cutback มีส่วนช่วยในการเพิ่มค่าประสิทธิผลของฟิล์ม หล่อเย็นได้ดีโดยพบว่าหลุมจะช่วยในการสร้างการไหลที่





หมุนวนภายในหลุมก่อนไหลไปสู่ส่วนถัดไปซึ่งส่งผลให้ค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นจะเพิ่มสูงขึ้นที่ทุกๆ ส่วนท้ายของหลุมโดยสังเกตได้จากรูปที่ 7 และจาก แนวโน้มพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนรัศมีต่อความลึกของหลุม เพิ่มขึ้นส่งผลให้ภาพรวมของค่าประสิทธิผลของฟิล์มของ เย็นมีค่าที่ลดลง โดยที่อัตราส่วนรัศมีต่อความลึกของหลุม ที่ 1 มีประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นโดยรวมที่สูงที่สุด



รูปที่ 6 แสดงแนวโน้มของค่าประสิทธิผลของฟิล์มของเย็น ที่มีอัตราส่วนรัศมีต่อความลึกที่ต่างกัน ที่สภาวะ อัตราส่วนการเป่าเท่ากับ 1 โดยทำการเก็บค่าที่ Z/H = 6.2



รูปที่ 7 แสดงแถบสีของค่าประสิทธิผลของฟิล์มที่หล่อเย็น ที่อัตราส่วนความลึกต่อรัศมี (ก) R/D = 1.0 (ข)

R/D = 1.5 (ค) R/D = 2.22 และ (ง) R/D = 2.5 ที่สภาวะอัตราส่วนการเป่าเท่ากับ 1

3.3 ผลของค่าอัตราส่วนการเป่ากับค่าประสิทธิผลของ ฟิล์มหล่อเย็น

ผลจากการปรับค่าอัตราส่วนการเป่าที่ต่างกัน 4 ค่า คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ผลลัพธ์ดังที่แสดงในรูปที่ 8 พบว่าที่ค่าอัตราส่วนการเป่าที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นมีค่าสูงขึ้นในช่วงของระยะที่ X/H ประมาณระหว่าง 0 – 4 และมีผลลัพธ์ในทาง กลับกันเมื่ออยู่ในช่วงหลังจาก 6 ขึ้นไป คือค่าประสิทธิผล ของฟิล์มหล่อเย็นมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการเป่ามีค่าเพิ่ม สูงขึ้น



รูปที่ 8 แสดงแนวโน้มของค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อ เย็นที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการเป่า ที่อัตราส่วน รัศมีต่อความลึกของหลุมที่ 2.22 และ Z/H = 6.2

ซึ่งเป็นผลมาจาก ที่อัตราส่วนการเป่ามากขึ้นส่งผล ให้เกิดการให้เกิดการยกตัวขึ้นของอากาศเย็นออกจาก พื้นผิว Cutback ที่บริเวณหลังจากระยะที่ X/H เท่ากับ 6 (รูปที่ 9) ส่งผลทำให้อากาศหลักที่มีอุณหภูมิส่งกว่า สามารถแทรกผ่านเข้ามาข้างใต้ของอากาศเย็นที่มีการยก ตัวขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสูงผนังของ พื้นผิว Cutback ทำให้อุณหภูมิที่ผนังมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ ค่าประสิทธิผลมีค่าที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน





รูปที่ 10 ค่าประสิทธิผลเฉลี่ยโดยรวมของฟิล์มของเย็น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ที่สภาวะการไหลของ อากาศหลักที่เรย์โนลด์คงที่ (Re = 25.000) การเพิ่ม หลุมบนพื้นผิว Cutback มีส่วนช่วยในการเพิ่มค่า ประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็นเนื่องจากมีส่วนช่วยในการ เพิ่มพื้นผิวในการระบายความร้อนจากฟิล์มหล่อเย็น และ การไหลที่เกิดการหมุนวนภายในหลุมที่ส่วนท้ายของหลุม ส่งผลให้การระบายความร้อนจากฟิล์มหล่อเย็นมี ประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งพบว่าอัตราส่วนรัศมีต่อความลึก ของหลุมมีผลกระทบต่อค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็น ้อย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อค่าอัตราส่วนรัศมีต่อความลึกของ หลุมมีค่าน้อยลงส่งผลให้ค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็น มีค่ามากขึ้น และการแยกตัวขึ้นของอากาศเย็นจากพื้นผิว ของวัสดุส่งผลให้ค่าประสิทธิของฟิล์มหล่อเย็นนั้นมีค่า ลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าค่าอัตราส่วนการเป่าที่ เหมาะสมอยู่ที่ 0.5 ซึ่งจะทำให้อากาศเย็นยังคงปกคลุมอยู่ บริเวณพื้นผิวของวัสดุได้ตลอดพื้นผิวที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โมเดลความ ปั่นป่วน SST k- $oldsymbol{\omega}$ ยังให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ โดย งานวิจัยของ Silvia และ Giovanna [11] พบว่าการใช้ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ไม่สามารถจำลองผลการ ใหลจากการไหลที่หมุนวนขนาดใหญ่ที่แยกตัวจากปากรู ฉีดของส่วนหางของใบพัดกังหันได้ถูกต้องเท่ากับการ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธี Large Eddy



รูปที่ 9 ภาพตัดขวางที่ Z/H เท่ากับ 6.2 แสดงความเร็ว ของทิศทางการไหลที่ อัตราส่วนการเป่า (ก) M = 0.5 (ข) M = 1.0 (ค) M = 1.5 และ (ง) M = 2.0 ที่มีอัตราส่วนรัศมีต่อความลึกของหลุมที่ 2.22

เมื่อทำการพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วน รัศมีต่อความลึกของหลุมและอัตราส่วนการเป่า เป็นค่า ประสิทธิผลเฉลี่ยโดยรวมของฟิล์มหล่อเย็น ดังรูปที่ 10 พบว่าที่อัตราส่วนการเป่าเท่ากับ 0.5 มีผลกระทบเพียง เล็กน้อยต่อค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็น เมื่อมีค่า อัตราส่วนรัศมีต่อความลึกที่เปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อเพิ่ม ค่าอัตราส่วนการเป่าที่มากกว่า 1 ขึ้นไป พบว่าเมื่อค่า อัตราส่วนรัศมีต่อความลึกของหลุมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ประสิทธิผลเฉลี่ยโดยรวมของฟิล์มหล่อเย็น มีแนวโน้มที่ ลดลง CST - 28



Simulation (LES) ซึ่งการหมุนวนขนาดใหญ่ที่สภาวะไม่ คงตัว มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิผลของฟิล์มหล่อเย็น และการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ แต่การ จำลองการไหลด้วย LES มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมาก อีกทั้งยังต้องใช้เวลาใน การคำนวณนานมากเมื่อเทียบกับการจำลองการไหลด้วย แบบจำลองความปั่นป่วน RANS ซึ่งมีความเหมาะสมกว่า ในงานพัฒนาและออกแบบในอุตสาหกรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและ พัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) และทุน ผู้ช่วยวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Taslim M.E., S.S.D., Mehlman B.P. (1992). An experimental investigation of film cooling effectiveness for slots of various exit geometries. *AIAA J. Thermophys. Journal of Heat Transfer*, p. 302–307.

[2] F.J. Cunha, M.K.C. (2006). Trailing-edge cooling for gas turbines. *Journal of Propul*.Power, vol. 22 (2), p. 286–300.

[3] Zhihong G. (2007), Experimental investigation of film cooling effectiveness on gas turbine blades, *Texas A&M University*, p. 167.

[4] Sumanta A., Fuguo Z. (2012), Experimental and computational study of heat/mass transfer and flow structure for four dimple shapes in a square internal passage, *Journal of turbomachinery*, 2012. vol. 134(061028-1).

[5] Akira M, S.N., Hiroshi S, Kaoru I, Yoji O., Chiyuki N. (2012), Effects of surface geometry on film cooling performance at airfoil trailing edge, *Journal of Turbomachinery*, vol. 134(051033-1). [6] Satomi N, A.M., Hiroshi S, Yoji O, Chiyuki N, Kaoru I. (2013). Effects of shape and arrangement of dimples on film cooling performance over cutback surface at airfoil trailing edge, *ASME TurboExpo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*, San Antonio, Texas, USA. p. 13.

4 - 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก

[7] C. Neil Jordan, Lesley M. Wright. (2013). Heat transfer enhancement in a rectangular (AR 5 3:1) channel with V-shaped dimples, *Journal of Turbomachinery*, vol. 135(011028-1).

[8] Julia L, C.J.E., John K. Eaton. (2015). The effect of land taper angle on trailing edge slot film cooling, *Journal of Turbomachinery*, Mechanical Engineering Department, Stanford University, Stanford, CA 94305.

[9] Yano K., M.A., Sekijima M., Saito H. K. Iwamoto. (2015), Effects of dimpledcutbacksurface rotation angle on film cooling performance at airfoil trailing edge, *Proc. of Int. Gas Turbine Congress*. 2015: Tokyo Japan. p. 8.

[10] Akira M, K.Y., Masaki H, Hiroshi S, Kaoru I. (2017). Arrangement effects of inclined teardropshaped dimples on film cooling performance of dimpled cutback surface at airfoil trailing edge, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.107, p. 761–770.

[11] Silvia R., Giovanna B. (2014). Application of unsteady CFD methods to trailing edge cutback film cooling, *ASME Turbo Expo 2014*, Dusseldorf, Germany. p. 14.