ผลการพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้น สำหรับการไหลผ่านท่อตรงที่มีการหมุน

จากการศึกษาโดยวิธี *อะไพรเออร์รี่* เพื่อหาสมการความเค้นเรย์โนลด์ในแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้นชนิดที่ดีที่สุดจากกลุ่มวิจัยหลายๆกลุ่มพบว่า สมการของ Craft et al. (1996) ให้ทั้งค่าความเค้นตั้งฉาก ความเค้นเฉือน และค่าความเร็วที่ดีที่สุดแล้ว ยังได้ทำการปรับปรุงสมการของ Craft et al. (1996) เพิ่มเติมโดยนำค่า damping function ของ Gibson and Dafa'Alla (1994) มาช่วยในการคำนวณค่าที่บริเวณใกล้ผิว ซึ่งผลการศึกษาโดยใช้วิธีไพเออร์ให้ผลการศึกษาของ Craft et al. (1996) ร่วมกับ damping function ของ Gibson and Dafa'Alla (1994) ผ่านระนาบคู่ขนานและท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้เป็นที่น่าพอใจ ต่อจากนั้นได้ทำการประเมินแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดเชิงเส้นที่ใช้สมการความเค้นเรย์โนลด์ตามสมมุติฐานของ Boussinesq (1877) ชนิด high Reynolds number ร่วมกับ wall function พบว่า แบบจำลองชนิดเชิงเส้น $k-\varepsilon$ ที่ใช้ enhance และ non-equilibrium wall function มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาพัฒนาเพื่อขีดความสามารถของแบบจำลอง

ผลการศึกษาที่ผ่านมาทั้งให้พบว่าการคำนวณชนิด high และ low Reynolds number รวมถึงสมการความเค้นเรย์โนลด์แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้น มีสมรรถนะในการทำนายการไหลที่มีความซับซ้อนและเกิดการไหลวนให้ผลที่น่าพอใจ จึงทำการทดสอบแบบจำลองทั้งแบบ high และ low Reynolds number ชนิดไม่เชิงเส้นที่ใช้สมการความเค้นเรย์โนลด์ของ Craft et al. (1996) โดยการใช้ฟังก์ชันยูดีเอฟ (user defined function, UDF) ในซอฟต์แวร์ Fluent ในการศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองในการจำลองการไหลโดยจะใช้กรณีศึกษา 3 แบบเป็นตัวทดสอบได้แก่ ระนาบคู่ขนาน ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการหมุน

สำกรับการไหลผ่านระนาบคู่ขนานจากภาพที่ 37 แสดงผลการเปรียบเทียบรูปแบบความเร็วไร้มิติตามแกน x ที่ $Re_\tau = 180$, $Re_b = 5600$ ของการไหลผ่านระนาบคู่ขนาน พบว่าโดยทั่วไปแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นทุกตัวมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงโดยเฉพาะในช่วงใกล้ผิวค่าของ enhanced wall function ที่รวมกับ Craft et al. (1996) (EWF + Craft et al. (1996)) มีค่าดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดโดยที่ผลนั้นทับกับค่าอ้างอิงเลย

ต่อผลการศึกษาโดยการจำลองการไหลผ่านท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ $Re_b = 4410$ โดยเปรียบเทียบกับการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงของ Gavrilakis (1992) ภาพที่ 38 ถึง 40 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน x (streamwise velocity) ณ ตำแหน่ง $y/h = 0.1$, $y/h = 0.5$ และ $y/h = 0.9$ ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่ง $y/h = 0.1$ เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวมากที่สุด จากผลการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (DNS) จะเห็นได้ว่ารูปแบบความเร็วของการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงเกิดการบิดเบือนไปในช่วง $z/h = 0.4$ ถึง $z/h = 0.9$ อันเป็นผลกระทบเนื่องมาจากผลของการไหลวน ในส่วนนี้ทั้งแบบจำลองชนิดเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นไม่สามารถทำนายในส่วนที่ถูกบิดเบือนได้ ในส่วนบริเวณใกล้ผิวด้านล่างนั้น $(z/h < 0.2)$ ที่ตำแหน่ง y/h ทั้งสามพบว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้น Craft et al. (1996) นั้นมีค่าที่เข้าใกล้ค่าอ้างอิงมากกว่าแบบจำลองชนิดเชิงไม่เชิงเส้นตัวอื่น ต่อมาในส่วนบริเวณใกล้แกนกลางของท่อทั้งสามตำแหน่งพบว่าผลของแบบจำลองชนิดเชิงเส้นแสดงผลของรูปแบบของความเร็วที่ผิดเพี้ยนไปจากค่าอ้างอิงมาก ส่วนแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นทั้งหมดมีลักษณะรูปแบบความเร็วใกล้เคียงกัน โดยผลของ Craft et al. (1996) นั้นใกล้เคียงค่าอ้างอิงมากกว่าแบบจำลองอื่น ต่อมาภาพที่ 41 ถึง 43 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน y (cross-stream velocity) ณ ตำแหน่ง $y/h = 0.1$, $y/h = 0.5$ และ $y/h = 0.9$ ที่ $Re_b = 4410$ ตามลำดับ จากผลทั้งสามตำแหน่งเห็นได้ชัดเจนว่าแบบจำลองชนิดเชิงเส้นไม่สามารถทำนายความเร็วในแนวแกนนี้ได้เลย สำหรับค่า การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วเฉลี่ยตามแกน y ที่มากที่สุดเกิดที่บริเวณใกล้ผิว $(y/h = 0.1)$ แสดงให้เห็นว่าการไหลวนเกิดมากที่สุดในบริเวณใกล้ผิวนั้นเอง ที่ตำแหน่ง $y/h = 0.1$ เห็นได้ว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นสามารถทำนายทั้งรูปแบบและปริมาณของความเร็วได้เพียงเล็กน้อย ในตำแหน่งที่ห่างจากผิวออกมาที่ $y/h = 0.5$ พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายรูปแบบความเร็วได้อย่างน่าพอใจ ในส่วนของตำแหน่งที่ $y/h = 0.9$ ในส่วนนี้เป็นบริเวณที่ผลกระทบของการไหลวนเกิดน้อยที่สุด แบบจำลองทั้งหมดสามารถทำนายได้ทั้งรูปแบบและปริมาณของความเร็วได้ดีในช่วงใกล้ผิวด้านล่างที่ $z/h = 0.1$ สำหรับการทำนายรูปแบบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน y นี้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นยังเกิดปัญหาในส่วนที่เกิดการไหลวนในปริมาณมาก ต่อมาภาพที่ 44 ถึง 46 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน z (spanwise velocity) ณ ตำแหน่ง $y/h = 0.1$, $y/h = 0.5$ และ $y/h = 0.9$ ที่ $Re_b = 4410$ จากผลทั้งสามตำแหน่งเห็นได้ชัดเจนว่าแบบจำลองชนิดเชิงเส้นไม่สามารถทำนายความเร็วในแนวแกน z นี้ได้เลยซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน y และสอดคล้างกับทฤษฎีของการเกิดการไหลวน จากผลการศึกษาบริเวณที่ใกล้ผิวที่ $y/h = 0.1$ พบว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นทุกตัวผลการศึกษาที่คล้ายกันโดยสามารถทำนายในบริเวณใกล้ผิวได้แต่เมื่อปริมาณของการ

ไหลวนเพิ่มขึ้นแบบจำลองให้ผลการทำนายยังไม่ดีเท่าที่ควร แต่ในช่วงบริเวณใกล้แกนกลางท่อพบว่าแบบจำลองมีรูปแบบที่คล้ายกับค่าอ้างอิง ต่อมาที่ตำแหน่ง $y/h=0.5$ จาก การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงพบว่าในตำแหน่งนี้ปริมาณการไหลวนเกิดสูงมากส่วนแบบจำลองสามารถทำนายรูปแบบความเร็วในบริเวณใกล้ผิวได้ แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงแกนกลางท่อพบว่าแบบจำลองยังให้ผลที่ไม่น่าพอใจ ส่วนที่ตำแหน่ง $y/h=0.9$ พบว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นของ Craft et al. (1996) และ Craft et al. (1996) ที่ใช้ damping function ของ Gibson and Dafa'Alla (1994)ให้ผลในช่วงใกล้ผิวดีกว่าแบบจำลองชนิดอื่น จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้นพบว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นให้ผลดีกว่าแบบไม่เชิงเส้นในทุกกรณีศึกษา สำหรับการทำนายการไหลหลัก และการไหลวนนั้นแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นให้ผลการศึกษาที่คล้ายคลึงกัน ผลการจำลองการโดยรวมพบว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้น Craft et al. (1996) ให้ที่ดีกว่าแบบจำลองชนิดอื่นทั้งช่วงใกล้ผิวและช่วงแกนกลางของท่อ

การใช้แบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นกับการไหลผ่านท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสภายที่มีการหมุนของ Martensson et al. (2005) ที่ Re_b เท่ากับ 4400 และ Ro เท่ากับ 0.055 และ 0.11 จากภาพที่ 47 ถึง 48 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน x บนระนาบ xy ณ ตำแหน่ง $z/h=0.5$ ที่ Ro เท่ากับ 0.055 และ 0.11 ตามลำดับ เนื่องจากที่ระนาบนี้จะเป็นระนาบที่เห็นผลกระทบจากการไหลวนขนาดใหญ่บริเวณด้าน pressure side $(y/h=1)$ โดย การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงสามารถทำนายค่าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน x ที่ได้รับผลกระทบจากการไหลวนทำให้ค่าความเร็วมีการเบี่ยงเบนลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ต่อมาที่บริเวณด้าน suction side $(y/h=0)$ ด้านนี้จะมีการไหลวนต่ำที่กว่าปกติและผลกระทบที่เกิดจากการไหลวนที่มีขนาดใหญ่ที่ด้านตรงข้ามทำให้ค่าความเร็วด้านนี้มีค่าสูงเกิดกว่าปกติ สำหรับภาพที่ 48 ที่มีค่าการหมุนสูงมากขึ้นพบว่าการไหลวนมีปริมาณสูงมากขึ้นที่บริเวณด้าน pressure side จากปรากฏการการหมุนที่สูงขึ้นนี้ได้ส่งผลให้ค่าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน x ทั้งด้าน pressure และ suction side มีค่าที่สูงกว่าปกติมาก จากภาพที่ 47 ที่ Ro เท่ากับ 0.055 ผลที่ได้จากการจำลองการไหลโดยแบบจำลองชนิดเชิงเส้นนั้นพบว่ามีค่าที่ต่ำกว่าค่าของ Craft et al. (1996) เล็กน้อย ด้านรูปแบบการไหลนั้นก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับ Craft et al. (1996) ด้วย ต่อมาในส่วนของแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นพบว่าแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นทุกชนิดยกเว้นแบบจำลองชนิด non-equilibrium wall function ที่ใช้ Craft et al. (1996) (NEWF + Craft et al (1996)) มีรูปแบบความเร็วที่คล้ายกันโดยในด้าน pressure side ได้รับผลกระทบจากการไหลวนจนเกิดการเบี่ยงเบน ส่วนในด้าน suction side นั้นมีลักษณะรูปแบบความเร็วที่โก่งขึ้นเล็กน้อย ด้านแบบจำลองชนิด non-equilibrium wall function ที่ใช้ Craft

et al. (1996) พบว่าลักษณะรูปแบบความเร็วไม่เกิดการเบี่ยงเบนที่ด้าน pressure side และไม่เกิดการโก่งขึ้นที่ด้าน suction side ส่วนรูปแบบความเร็วที่บริเวณใกล้ผิวนั้นในด้าน pressure side พบว่าแบบจำลองทั้งหมดจำลองรูปแบบความเร็วยังห่างจากค่าอ้างอิงอยู่ ในส่วนด้าน suction side แบบจำลองสามารถจำลองรูปแบบความเร็วได้ค่อนข้างน่าพอใจ ด้านบริเวณแกนกลางของท่อพบว่าแบบจำลองนั้นจำลองปริมาณการไหลยังค่อนข้างห่างจากค่าอ้างอิงอยู่ จากภาพที่ 47 ที่ Ro เท่ากับ 0.11 ผลที่ได้จากการจำลองการไหลโดยแบบจำลองชนิดเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นให้มีรูปแบบความเร็วที่คล้ายคลึงกันโดยแบบจำลองทั้งหมดไม่สามารถทำนายการเบี่ยงเบน และการโก่งของความเร็วเนื่องจากการไหลวน ในช่วงใกล้ผิวทั้งด้าน pressure และ suction side แบบจำลองสามารถจำลองรูปแบบที่ค่อนข้างคล้ายกับค่าอ้างอิงแต่ปริมาณที่ทำนายได้นั้นมีปริมาณที่ต่ำกว่าค่าอ้างอิง ในบริเวณแกนกลางของท่อนั้นแบบจำลองทำนายปริมาณได้ต่ำกว่าค่าอ้างอิงมาก ต่อมาในส่วนของภาพที่ 49 ถึง 50 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแกน x บนระนาบ xz ณ ตำแหน่ง $y/h = 0.5$ ที่ Ro เท่ากับ 0.055 และ 0.11 ตามลำดับ ที่ระนาบนี้เป็นระนาบที่ได้รับผลกระทบการไหลวนมาก จากผลของการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงพบว่าที่บริเวณแกนกลางของท่อผลกระทบของการไหลวนทำให้ความเร็วตามแกน x มีรูปแบบเปลี่ยนไปจากรูปพาราโบลากลายโดยเกิดการยุบตัวลงของความเร็วคล้ายกับลักษณะของเส้นตรง ด้านบริเวณที่ใกล้ผิวทั้งข้างที่ $z/h = 0$ และ $z/h = 1$ พบว่าเกิดค่าความเร็วที่สูงขึ้นแล้วลดลง ด้านปริมาณของความเร็วโดยรวมพบว่ามีค่าที่สูงขึ้นตามปริมาณการวนที่เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนนี้ยังพบอีกว่าค่าความเร็วตามแกน x บนระนาบ xz นี้มีลักษณะที่สมมาตรกันตามแนวแกน y สำหรับการจำลองการไหลของแบบจำลองที่ Ro เท่ากับ 0.055 ดังภาพที่ 49 พบว่าลักษณะการไหลของแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นทุกชนิดยกเว้นแบบจำลองชนิด non-equilibrium wall function ที่ใช้ Craft et al. (1996) ให้ผลที่คล้ายคลึงกันโดยจะเห็นการยุบตัวของความเร็วบริเวณแกนกลางได้อย่างชัดเจน แต่ค่าความเร็วที่สูงขึ้นที่ผิวทั้งสองข้างแบบจำลองยังไม่สามารถจำลองได้อย่างชัดเจน ส่วนปริมาณของความเร็วโดยรวมนั้นยังมีค่าที่ค่อนข้างห่างจากค่าอ้างอิงอยู่จากภาพที่ 50 พบว่าแบบจำลองทั้งหมดให้ผลการศึกษาที่คล้ายคลึงกันโดยไม่สามารถจำลองการยุบตัวบริเวณแกนกลาง และการโก่งขึ้นของความเร็วที่ใกล้ผิวได้ สำหรับปริมาณความเร็วโดยรวมนั้นมีค่าที่ห่างจากค่าอ้างอิงค่อนข้างมาก

จากผลการศึกษาในส่วนนี้พบว่าการคำนวณในบริเวณใกล้ผิวของแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นระหว่าง high และ low Reynolds number นั้นเห็นได้ว่าแบบ low Reynolds number ที่ใช้ damping function นั้นให้ผลการศึกษาร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้นให้ผลการศึกษาที่ดีกว่าการใช้ wall function ดังนั้น damping function จึงมีความเหมาะสมกับแบบจำลอง

ความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้นมากกว่า wall function