ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการแทรกตัวของอากาศในม้วนแผ่นฟิล์มบางภายใต้แรงกดแบบพลวัต

Effect of Temperature on Air Entrainment into Thin Film Rolls under Dynamic Nip Compression

พุทธา จีนครัว[1]*

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถนน ลงหาดบางแสน อำเภอ เมือง จังหวัด ชลบุรี 20131
*ติดต่อ: puttha@buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิอากาศต่อชั้นฟิล์มอากาศที่แทรกเข้าไปในม้วนแผ่นฟิล์มในขั้นตอนการม้วนที่มีลูกกลิ้งกดทับ อากาศที่แทรกตัวระหว่างชั้นแผ่นฟิล์มเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการม้วนเนื่องจากปรากฏการณ์การลื่นไถลภายในม้วนแผ่นฟิล์ม ดังนั้นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความหนาฟิล์มอากาศ อาธิเช่น อุณหภูมิอากาศและแรงกดทับของลูกกลิ้งจึงมีความสำคัญ ชั้นอากาศที่แทรกตัวในม้วนแผ่นฟิล์มสามารถที่จะอธิบายโดยสมการเรย์โนลด์ที่ปรับปรุง สมการการเสียรูปของวัสดุ สมการความหนาฟิล์มอากาศและสมการสมดุลแรงตามลำดับ วิธีผลต่างสืบเนื่องและวิธีนิวตันราฟสันนำมาใช้เพื่อได้ผลการคำนวณเชิงตัวเลขเช่น การกระจายความดันอากาศและการกระจายความหนาฟิล์มอากาศภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดขณะม้วนแผ่นฟิล์มภายใต้แรงกดที่เป็นพลวัตแบบเพิ่มขึ้นเชิงเส้นและแบบแรงกดทับคงที่ ผลการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าความหนาฟิล์มอากาศสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิอากาศสูง แรงกดทับพลวัตแบบฟังก์ชันเชิงเส้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันการไถลของแผ่นฟิล์มในกระบวนการม้วนแผ่นฟิล์ม

คำหลัก: อากาศแทรกตัว; ม้วนแผ่นฟิล์ม; แรงกดพลวัต; อุณหภูมิอากาศ

Abstract

This paper presents the effect of air temperature on the air film layers entrained into a thin film roll at the winding process with a nip roller. The air entrainment between film layers is important parameter that affects the effective roll because of the slippage phenomenon into thin film roll. Therefore, the study of parameters affecting air film thickness such as air temperatures and nip loads become significant. The entrained air layer into a film roll is described by the modified Reynolds equation, the equation of material deformation, the air film thickness equation and the equilibrium load equation respectively. A finite difference method and a Newton-Raphson scheme are used to achieve numerical results, i.e. air pressure and air film thickness distributions under varying air temperature and the minimum air film thickness as winding film under a linearly increasing dynamic nip compression and a constant nip compression. The numerical results show that the air film thickness is increased because of the high air temperature. The dynamic nip compression with linear function is very effective in preventing the slippage of thin film in a film winding process.

Keywords: Air entrainment; film roll; dynamic nip compression; air temperature.

1. บทนำ

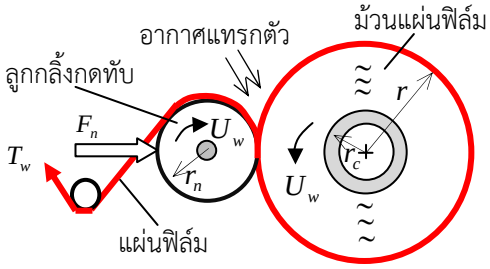
ในปัจจุบันวัสดุประเภทแผ่นฟิล์มบางผลิตและนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของสินค้าทางอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายเช่น แผ่นฟิล์มพลาสติก แผ่นฟิล์มเซลล์แสงอาทิตย์ กระดาษในสื่อสิ่งพิมพ์หรือแผ่นฟิล์มแถบแม่เหล็ก เป็นต้น โดยที่ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องใช้

ลูกกลิ้งจำนวนมากในการรองรับและขนถ่ายแผ่นฟิล์ม กระบวนการผลิตดังกล่าวถูกเรียกว่ากระบวนการผลิตแบบลูกกลิ้งถึงลูกกลิ้ง (Roll-to-roll, web handling) [1-2] โดยที่แผ่นฟิล์มบางจะถูกม้วนออกที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการผลิตจากนั้นแผ่นฟิล์มบางจะเคลื่อนที่ภายใต้แรงดึงผ่านลูกกลิ้งเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิว เสริมความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มเป็นต้น และแผ่นฟิล์มบางก็จะถูกม้วนเก็บในขั้นตอนสุดท้าย (Winding process) โดยแผ่นฟิล์มจะถูกเก็บเป็นม้วนแผ่นฟิล์ม สำหรับในขั้นตอนการม้วนแผ่นฟิล์มนั้นอากาศบริเวณโดยรอบจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นแผ่นฟิล์มและเมื่อมีชั้นความหนาของอากาศมากเกินไปจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของการม้วนแย่ลงและนำไปสู่การเกิดการไถลของแผ่นฟิล์มขณะที่ทำการม้วน ส่งผลทำให้ม้วนแผ่นฟิล์มเกิดการเสียหายและกระบวนการผลิตจะต้องหยุดเพื่อทำการแก้ไขส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น [3]

สำหรับงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการม้วนแผ่นฟิล์มสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ Yanabe และคณะ [4] ได้ศึกษาการเหลื่อม (telescoping) ของขอบแผ่นฟิล์มขณะม้วนโดยจำลองการม้วนโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พบว่าการเอียงของลูกกลิ้งที่เป็นแกนในการม้วนฟิล์มและการไม่สมดุลของแรงดึงแผ่นฟิล์มทำให้เกิดการเหลื่อมของขอบแผ่นฟิล์มในม้วนแผ่นฟิล์ม Chang และคณะ[5]ได้คำนวณและแสดงให้เห็นว่า ขณะม้วนแผ่นฟิล์มจะมีอากาศแทรกตัวเข้าในม้วนฟิล์ม Lei และคณะ[6] ได้นำโมเดลของ Chang มาประมาณค่าชั้นอากาศที่แทรกในม้วนฟิล์มและศึกษาผลของอากาศต่อความเค้นภายใต้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหลังจากการม้วน การศึกษาของ Sasaki และคณะ[7] ช่วยยืนยันว่าแผ่นฟิล์มจะเกิดการไถลเมื่อใช้ความเร็วที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการศึกษาพฤติกรรมของอากาศที่แทรกตัวภายใต้อุณหภูมิห้อง (25 ^{0}C) และแรงกดทับคงที่ตลอดการม้วนแผ่นฟิล์ม ดังนั้นในบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการแทรกตัวของอากาศภายใต้การเพิ่มขึ้นอุณหภูมิบรรยากาศในขั้นตอนการม้วนแผ่นฟิล์มโดยมีลูกกลิ้งกดทับ โดยทำการศึกษาในทางทฤษฎีโดยการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิบรรยากาศต่อความหนาฟิล์มอากาศที่แทรกในม้วนแผ่นฟิล์มและทำการศึกษารูปแบบแรงกดทับตลอดการม้วนแผ่นฟิล์มในแบบพลวัตที่เป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบกับกรณีใช้แรงกดทับคงที่ตลอดการม้วน

2. ทฤษฎีการแทรกตัวของอากาศในม้วนแผ่นฟิล์ม

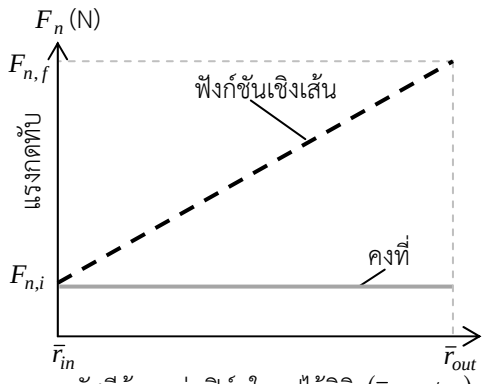
รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการม้วนแผ่นฟิล์มโดยมีลูกกลิ้งกดทับ โดยแผ่นฟิล์มจะเคลื่อนที่ภายใต้แรงดึง T_w และมีความเร็วเท่ากับความเร็วของม้วนแผ่นฟิล์มและลูกกลิ้งกดทับ U_w จากนั้นแผ่นฟิล์มจะเคลื่อนที่ติดไปกับลูกกลิ้งกดทับและถูกม้วนเก็บเป็นม้วนแผ่นฟิล์ม ในขณะทำการม้วนลูกกลิ้งกดทับที่มีรัศมี r_n จะออกแรงกด F_n เพื่อลดปริมาณอากาศที่แทรกตัวเข้าไปในม้วนแผ่นฟิล์ม สำหรับม้วนแผ่นฟิล์มจะมีรัศมีแกนกลาง r_c และรัศมีวงนอกสุดซึ่งเป็นชั้นแผ่นฟิล์มล่าสุดที่ถูกม้วน r โดยที่รัศมีของม้วนแผ่นฟิล์มจะเพิ่มขึ้นจนสิ้นสุดกระบวนการผลิต



รูปที่ 1 การม้วนแผ่นฟิล์มโดยมีลูกกลิ้งกดทับ

สำหรับสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความหนาฟิล์มอากาศที่แทรกเข้าไปในม้วนแผ่นฟิล์มสามารถที่จะอธิบายตามสมการดังต่อไปนี้

2.1 สมการแรงกดทับขณะม้วนแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 2 แรงกดทับขณะม้วนแผ่นฟิล์ม

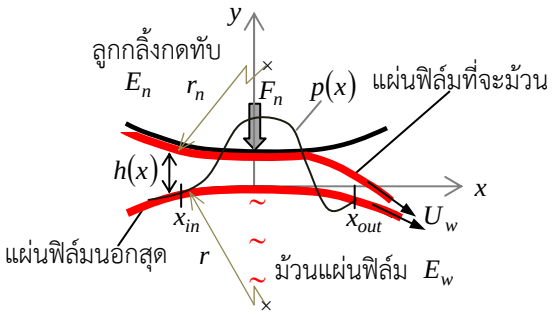
รูปที่ 2 แสดงรูปแบบแรงกดทับ F_n ขณะที่ทำการม้วนแผ่นฟิล์ม เมื่อม้วนแผ่นฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างลูกกลิ้งกดทับและม้วนแผ่นฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยส่งผลให้อากาศสามารถที่จะแทรกเข้าม้วนแผ่นฟิล์มมากขึ้น ดังนั้นในบทความนี้จึงศึกษาการเพิ่มแรงกดทับขณะทำการม้วนแผ่นฟิล์มในรูปแบบที่อยู่ในฟังก์ชันเชิงเส้น สำหรับแรงกดทับเชิงเส้นสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (1)

$$F_n = \left(\frac{F_{n,f} - F_{n,i}}{\bar{r}_{out} - \bar{r}_{in}} \right) \bar{r} + F_{n,i} \qquad (1)$$

โดยที่ $F_{n,i}$ เป็นแรงกดทับเริ่มต้น $F_{n,f}$ เป็นแรงกดทับสุดท้าย $\bar{r}_{in}$ เป็นรัศมีของม้วนแผ่นฟิล์มไร้มิติเริ่มต้น $\bar{r}_{out}$ เป็นรัศมีของม้วนแผ่นฟิล์มไร้มิติสุดท้าย $\bar{r}$ เป็นรัศมีของม้วนแผ่นฟิล์มไร้มิติในรอบการม้วนใดๆ

2.2 สมการการหล่อลื่นอากาศ

รูปที่ 3 แสดงลักษณะการสัมผัสของผิวของแผ่นฟิล์มที่พันกับลูกกลิ้งกดกับผิวของม้วนแผ่นฟิล์ม เนื่องจากผิวทั้งสองมีความเร็วจึงทำให้เกิดการกระจายความดันอากาศ $p(x)$ ในพื้นที่สัมผัสและถ้าเกิดความดันอากาศมากพอก็จะทำให้ผิวสัมผัสแยกจากกันโดยมีความหนาฟิล์มอากาศ $h(x)$ สำหรับการกระจายความดันอากาศสามารถที่จะคำนวณหาได้โดยใช้สมการเรย์โนลด์ตามที่แสดงในสมการที่ (2)



รูปที่ 3 อากาศระหว่างลูกกลิ้งกดทับและม้วนฟิล์ม

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\left\{ h^3 + 6\lambda h^2 \right\} p \frac{dp}{dx} \right] = 12\eta_T U_w \frac{d(ph)}{dx} \qquad (2)$$

โดยที่ x เป็นแกนในระบบพิกัดฉากตามแนวสัมผัส λ เป็นค่า mean free path ของอากาศ และ η_T เป็นค่าความหนืดของอากาศซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ โดยมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิดังที่แสดงในสมการที่ (3) [8] ซึ่งมีหน่วยเป็น Pa.s

$$\eta_T(T) = (0.0045.T + 1.7178) \times 10^{-5} \qquad (3)$$

สำหรับความหนาฟิล์มอากาศ h มีค่าขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของการสัมผัสกันระหว่างลูกกลิ้งกดทับและม้วนแผ่นฟิล์มและมีค่าขึ้นกับการเสียรูปของวัสดุ สำหรับในการสัมผัสที่ลักษณะเป็นเชิงเส้น (Line contact) สมการความหนาฟิล์มอากาศสามารถที่จะแสดงได้ตามสมการที่ (4)

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2R'} - \frac{1}{\pi E'} \int_{x_{in}}^{x_{out}} p(x) \ln(x - x')^2 \, dx' \qquad (4)$$

โดยที่ h_0 เป็นความหนาฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางการสัมผัส ($x = 0$) R' และ E' เป็นค่ารัศมีเสมือนและค่ายังมอดูลัสเสมือนและสามารถที่จะคำนวณได้ตามสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$R' = \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r} \right)^{-1} \qquad (5)$$

$$E' = \left[\frac{\left(1 - \nu_n^2\right)}{E_n} + \frac{\left(1 - \nu_w^2\right)}{E_w} \right]^{-1} \qquad (6)$$

ตัวแปรในสมการที่ (6) แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุ ν_n และ ν_w เป็นค่าอัตราส่วนปัวซองของลูกกลิ้งกดทับและแผ่นฟิล์ม E_n และ E_w เป็นค่ายังมอดูลัสของลูกกลิ้งกดทับและม้วนแผ่นฟิล์มตามลำดับ

2.3 สมการสมดุลแรง

จากรูปที่ 3 จะเกิดความหนาฟิล์มอากาศก็ต่อเมื่อความดันอากาศระหว่างลูกกลิ้งกดทับและม้วนแผ่นฟิล์มในช่วงพื้นที่สัมผัส ($x_{out} - x_{in}$) มีค่ามากพอที่จะแบกรับแรงกดทับ F_n หรืออยู่ในสภาวะสมดุลแรงในแกน y สำหรับสมการสมดุลแรงถูกแสดงตามสมการที่ (7) โดยที่ L เป็นความกว้างของม้วนฟิล์ม

$$F_n = L \int_{x_{in}}^{x_{out}} p(x) dx \qquad (7)$$

3. การคำนวณเชิงตัวเลข

สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข สมการเรย์โนลด์สมการความหนาฟิล์มอากาศและสมการสมดุลแรงจะถูกทำให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ สำหรับตัวอย่างสมการที่อยู่ในรูปไร้มิติเช่นสมการเรโนลด์สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติตามสามการที่ (8)

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(Q\frac{\partial P}{\partial X}\right)=K\frac{\partial}{\partial X}(PH) \qquad (8)$$

โดยที่ $Q=PH^3\left(1+\frac{6\lambda R'}{b^2H}\right)$ $K=\left(\frac{6\eta_T U_w R'^2}{b^3 p_a}\right)$

$b=R'\left(\frac{8F_n}{\pi E'R'^2}\right)^{0.5}$ $P=p/p_a$ $H=h/\left(b^2/R'\right)$

$X=x/b$ และ p_a เป็นความดันบรรยากาศ

จากนั้นคำนวณหาแรงดันอากาศโดยการแก้สมการเรโนลด์ในรูปไร้มิติโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องและวิธีนิวตันราฟสัน โดยผลการคำนวณจะลู่เข้าคำตอบเมื่อคำตอบที่ได้มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 1×10^{-5}

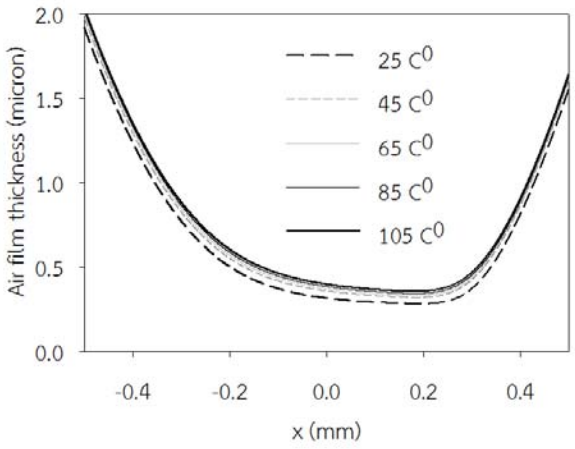
แผ่นฟิล์มที่ใช้ศึกษาเป็น PET ความหนา 50 μm คุณสมบัติและขนาดของวัสดุแสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้

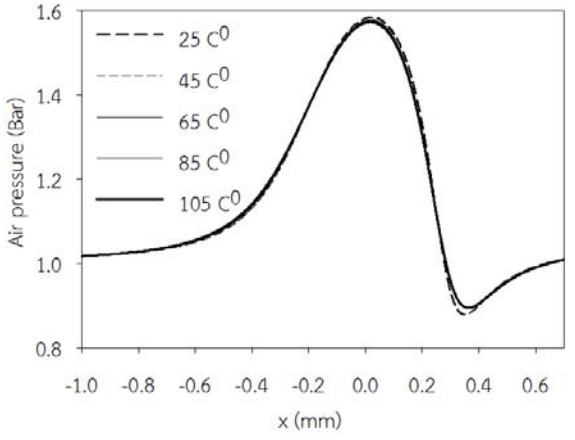
รายการ	ขนาด
รัศมีแกนม้วนฟิล์ม r_c [m]	0.025
ความกว้างของม้วนฟิล์ม L [m]	0.3
รัศมีลูกกลิ้งกดทับ r_n [m]	0.0445
ยังมอดูลัสของม้วนฟิล์ม E_w [GPa]	0.056
ยังมอดูลัสของลูกกลิ้งกดทับ E_n [GPa]	0.027
อัตราส่วนปัวซองของแผ่นฟิล์ม ν_w	0.3
อัตราส่วนปัวซองของลูกกลิ้งกดทับ ν_n	0.5
ความหยาบผิว rms ของแผ่นฟิล์ม [μm]	0.05

4. ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขในบทความนี้แสดงค่าการกระจายความหนาฟิล์มอากาศและความดันในพื้นที่สัมผัสระหว่างลูกกลิ้งกดทับกับม้วนแผ่นฟิล์มและความหนาฟิล์มต่ำสุดตลอดการม้วนฟิล์ม ($\bar{r}=1.0-2.0$) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงกดทับ สำหรับผลการคำนวณถูกแสดงในรูปที่ 4 – 7 ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศในพื้นที่สัมผัสภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าความหนาฟิล์มอากาศจะมีความหนามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นอันเนื่องมาจากความหนืดของอากาศจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้นที่อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นอากาศโดยรอบสามารถที่จะแทรกตัวเข้าในม้วนแผ่นฟิล์มได้ง่ายส่งผลทำให้แผ่นฟิล์มมีโอกาสที่จะเกิดการไถลขณะม้วนฟิล์มที่อุณหภูมิดังกล่าว อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิอากาศส่งผลต่อความดันอากาศในพื้นที่สัมผัสระหว่างลูกกลิ้งกดทับและม้วนแผ่นฟิล์มน้อยมาก โดยที่ในพื้นที่สัมผัสในช่วง-1.0< x <-0.2 ความดันอากาศแทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับในช่วง -0.2< x <0.2 ความดันอากาศลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและในช่วง 0.2< x <0.4 ความดันอากาศลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศตามที่แสดงในรูปที่ 5

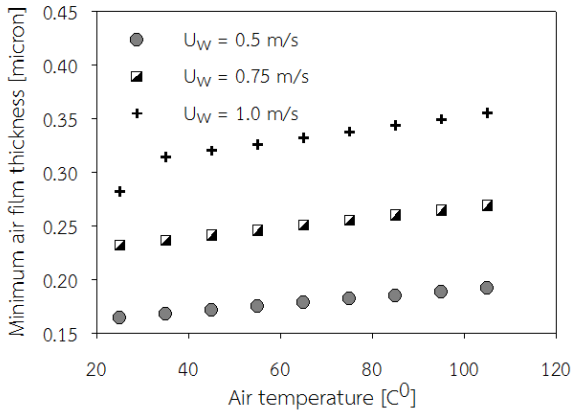


รูปที่ 4 ความหนาฟิล์มอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ
($\bar{r}=1.85, F_n=25N, U_w=1.0$ m/s)



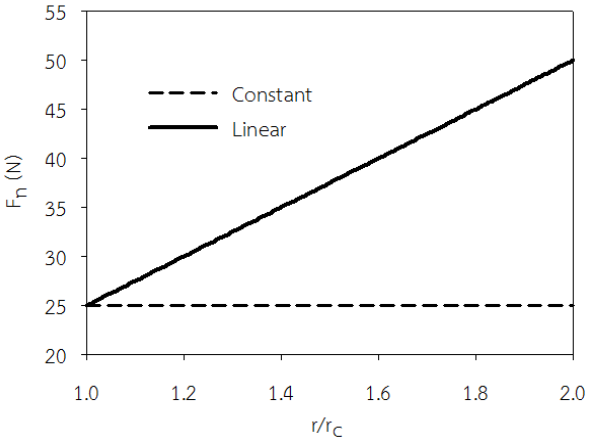
รูปที่ 5 ความดันอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ
($\bar{r}=1.85, F_n=25N, U_w=1.0$ m/s)

รูปที่ 6 แสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดในพื้นที่สัมผัสภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการม้วนฟิล์มและอุณหภูมิอากาศ โดยพิจารณาที่ตำแหน่งม้วนฟิล์ม $\bar{r} = 1.85$ และใช้แรงกด $F_n = 25\,N$ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อใช้ความเร็วให้การม้วนแผ่นฟิล์มเร็วขึ้นความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะมีค่าสูงขึ้นทุกช่วงอุณหภูมิอากาศที่ทำการศึกษา ดังนั้นที่ความเร็วสูงขึ้น อากาศสามารถที่จะแทรกตัวเข้าในม้วนฟิล์มได้ง่ายกว่าการใช้ความเร็วการม้วนต่ำ

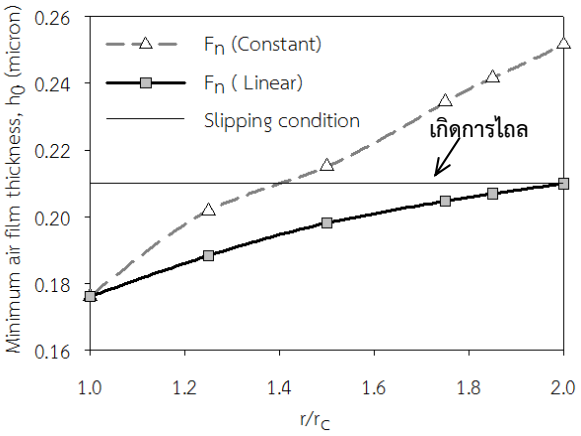


รูปที่ 6 ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดที่อุณหภูมิต่างๆ
($\bar{r} = 1.85$, $F_n = 25\,N$)

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำนายการเกิดการไถลของแผ่นฟิล์ม[9,10,11] โดยที่การไถลจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาฟิล์มอากาศมีค่ามากกว่าสามเท่าของความหยาบผิวรวมเฉลี่ยระหว่างชั้นของแผ่นฟิล์มบาง ($h_0 > 3\sigma \approx 0.21\mu m$) ดังนั้นตลอดการม้วนฟิล์ม ($1.0 \le r/r_c \le 2.0$) ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด h_0 ต้องไม่เกินค่าดังกล่าวข้องต้นเพื่อป้องกันการเกิดการไถลของแผ่นฟิล์มขณะม้วน รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการแทรกตัวของอากาศตลอดการม้วนแผ่นฟิล์มโดยใช้แรงกดแบบคงที่และแรงกดแบบเพิ่มขึ้นเชิงเส้นดังที่แสดงในรูป 7 (ก) โดยทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ $T = 45\,^0C$ และความเร็วการม้วน $U_w = 0.75$ m/s จากผลการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อม้วนฟิล์มใหญ่ขึ้นความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะมีค่ามากขึ้น แต่ในกรณีที่ใช้แรงกดทับคงที่การเพิ่มขึ้นของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่ามากกว่ากรณีที่ใช้แรงกดทับแบบพลวัตเพิ่มขึ้นเชิงเส้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ม้วนฟิล์มมีขนาดประมาณ $r/r_c = 1.4$ กรณีที่ใช้แรงกดทับคงที่จะเกิดการไถลขณะที่ทำการม้วน แต่สำหรับการใช้แรงกดทับแบบพลวัตเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตลอดการม้วนแผ่นฟิล์ม ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดอยู่ต่ำกว่าสภาวะที่เกิดการไถลของแผ่นฟิล์ม



(ก) แรงกดขณะม้วนแผ่นฟิล์ม



(ข) ความหนาฟิล์มต่ำสุดที่แทรกในม้วนฟิล์มขณะม้วน
รูปที่ 7 พฤติกรรมการแทรกตัวของอากาศขณะม้วนภายใต้แรงกดแบบคงที่และแบบเชิงเส้น
($U_w = 0.75$ m/s, $T = 45\,^0C$)

5. สรุป

บทความนี้ศึกษาการแทรกตัวของอากาศเข้าในม้วนฟิล์มขณะม้วนภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศ โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบการใช้แรงกดทับแบบคงที่และแบบพลวัตเพิ่มขึ้นเชิงเส้น จากการศึกษาโดยการคำนวณเชิงตัวเลขสามารถสรุปได้ดังนี้

1) อุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นส่งผลให้อากาศแทรกตัวในม้วนฟิล์มได้ง่าย แต่อุณหภูมิส่งผลต่อความดันอากาศในพื้นที่สัมผัสน้อย

2) การใช้แรงกดทับพลวัตแบบเพิ่มขึ้นเชิงเส้นช่วยป้องกันการเกิดการไถลของแผ่นฟิล์มขณะม้วนได้ดีกว่าการใช้แรงกดทับแบบคงที่

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความช่วยเหลือด้านค่าใช้จ่ายต่างๆ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Henry, T., Ma, W., Du, B., Chow, S.L., Kiew, C.M. and Arthur, T. (2013). Study of web slippage phenomena in roll-to-roll embossing system, paper presented in *10th IEEE International Conference on Control and Automation 2013*, Hangzhou, China.

[2] Frechard, J. and Knittel, D. (2013). Drive requirements for elastic web roll-to-roll systems, *Mechanism and Machine Theory*, vol.66, April 2013, pp.14-31.

[3] Hashimoto, H., Jeenkour, P. and Mongkolwongrojn, M. (2010). Optimum winding tension and nip load into wound webs for protecting wrinkles and slippage, *Journal of advanced mechanical design, systems and manufacturing,* vol.4 (1), July 2009,pp.214-225.

[4] Yanabe, S., Nagasawa, S. and Mitsomwang, P. (2014). Lateral shift of web edge shape of roll in winding process simulated by FEM, *Transactions of the JSME (in Japanness)*, vol.80(819), August 2014, pp.1-15.

[5] Chang, Y.B., Chambers, F.W. and Shrlton, J.J. (1996). Elastohydrodynamic lubrication of air-lubricated rollers, *Journal of tribology,* vol.118, July 1996,pp.623-628.

[6] Lei, H., Cole, K.A. and Weinstein, S.J. (2002). Modeling air entrainment and temperature effect in winding, *Journal of applied mechanics,* vol.76, November 2003,pp.902-914.

[7] Sasaki, M., Kohno, K., Tanimoto, K., Takahashi, S., Suzuki, S. and Hashimoto, H. (2007). Traction force between rotating rolls and moving web considering the effect of air-entrainment, *Journal microsystem technologies,* vol.13, December 2006, pp.1161-1167.

[8] พุทธา จีนครัว (2555). วิทยานิพนธ์, การศึกษาพฤติกรรมทางทฤษฎีของกระบวนการผลิตวัสดุที่เป็นแผ่นฟิล์มบาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 11-36.

[9] Hashimoto, H. and Okajima, M. (2006). Theoretical and experimental investigations into spacing characteristics between roller and three types of webs with different permeabilities, *Journal of Tribology*, vol.128, April 2006, pp.267-274.

[10] Byun, D., Quang Tran, S.B., Yoo, Y.H., Hwan Ko, J., Kim, J., Woo Lee, J. and Byun, Y.H. (2009). Experimental and numerical study of air entrainment between web and spirally grooved roller, *Journal of Tribology*, vol.131, April 2009, pp.1-8.

[11] Jeenkour, P.(2013). A numerical study on air-entrainment between a web and a convex guide roller in a web transportation process, *Applied Mechanics and Materials*, vol.392, September 2013, pp.110-115.