ศักยภาพและประสิทธิภาพของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

Potential and Efficiency of Solar Chimney in the Production of Electrical Energy

ทวิช จิตรสมบูรณ์

Tawit Chitsomboon

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000
Department of Mechanical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology, Nakorn - Ratchasima 30000, Thailand

บทคัดย่อ

ได้ทำการประเมินหาศักยภาพและประสิทธิภาพของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ด้วยการหาคำตอบให้แก่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองนี้แตกต่างจากแบบจำลองที่นักวิจัยในอดีตหลายๆ ท่านได้ทำไว้ในประเด็นความสามารถในการสร้างปฏิสัมพันธ์ของส่วนต่างๆ ในระบบได้ และยังสามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์เข้าระบบได้โดยตรง ความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากการประเมินหาคำตอบเชิงวิศวกรรมศาสตร์ได้ถูกจำกัดให้เป็นความผิดพลาดในเชิงบวกเท่านั้น ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่าปล่องลมแสงอาทิตย์อาจเป็นทางเลือกหนึ่งของโรงจักรต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่

ABSTRACT

The efficiency and potential of a solar chimney system in producing electricity is estimated by solving a mathematical model of the system. The mathematical model is different from previous models proposed by various researchers in that it can account for interactions of various parts of the system and is capable of direct solar insolation. Errors involved in obtaining engineering solution are ensured to be on the conservative side. The results obtained indicate the possibility of solar chimney as an alternative power plant for a large-scale production of electricity.

1. บทนำ

ปล่องลมแสงอาทิตย์ (Solar Chimney) ได้รับการเสนอให้เป็นทางเลือกอันหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงแสงอาทิตย์ ข้อได้เปรียบที่คาดว่าจะได้รับจากระบบนี้เหนือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic System) คือราคาที่ถูกกว่าต่อหน่วยพลังงาน และความสามารถในการสร้างอุปกรณ์ทุกชนิดได้ภายในประเทศ เพราะเทคโนโลยีทางการผลิตที่เกี่ยวข้องเป็นเทคโนโลยีที่ไม่สูงมากนัก ความยุ่งยากอยู่ที่ความเข้าใจหลักการทางกลศาสตร์ของไหลเพราะหากไม่เข้าใจหลักการอย่างถ่องแท้จะไม่สามารถ ออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงที่คุ้มทุนได้

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ หลักการทำงานอย่างกว้างๆ ของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์คือ การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์มาอุ่นอากาศภายใต้หลังคารับแสงอาทิตย์แบบโปร่งใสให้ร้อน โดยการใช้หลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) อากาศที่ร้อนนี้จะลอยตัวสูงขึ้นในปล่องลมตามหลักการของการพาความร้อนธรรมชาติ (Natural Convection) อากาศที่ลอยตัวขึ้นด้วยความเร็วอันหนึ่งนี้ จะถ่ายพลังงานจลน์ให้แก่กังหันเทอร์ไบน์ซึ่งสามารถนำไปหมุนเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าต่อไปได้ โดยแท้จริงแล้วระบบนี้คือระบบการสร้างลมเทียม

นั่นเอง ข้อเสียของระบบนี้คือจะต้องสร้างเป็นระบบขนาดใหญ่เท่านั้น และต้องการพื้นที่ราบเรียบ (ไม่สามารถสร้างตามที่ลาดชัน)

หลักการทำงานของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ได้มีการศึกษาโดยกลุ่มวิศวกรเยอรมัน [1, 2] โดยการสนับสนุนทางการเงินจากรัฐบาลเยอรมันนีและสเปน ได้สร้างโรงงานต้นแบบของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ขึ้นที่ทะเลทรายทางตอนใต้ของประเทศสเปน [3,4] โรงงานนี้มีหลังคารับแสงอาทิตย์เป็นแผ่นพลาสติกสูงจากพื้นดิน 2 เมตร หลังคามีรัศมีประมาณ 120 เมตร มีปล่องลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เมตร ที่ความสูง 200 เมตร ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 20 กิโลวัตต์ และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ 0.05% เท่านั้น ซึ่งนับว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ 5%

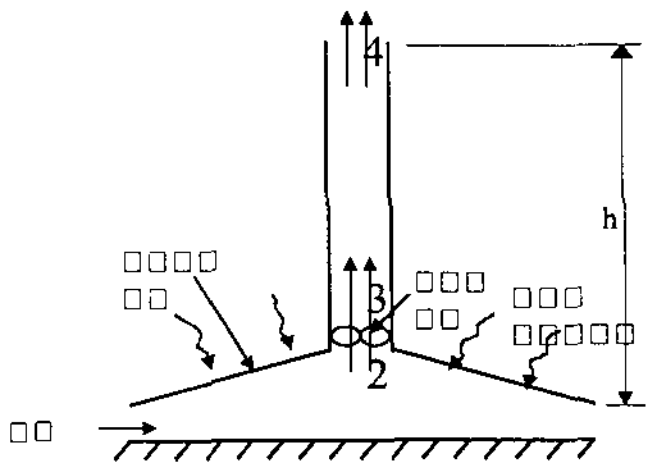

Figure1: Schematic of a solar chimney

สามารถอนุมานได้ว่าหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้อยู่ได้ในเกณฑ์ 0.5% ก็น่าจะแข่งขันกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้เนื่องจากราคาแผ่นพลาสติกหรือกระจกใสซึ่งใช้เป็นหลังคารับแสงอาทิตย์ของระบบมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นอุปกรณ์เซมิคอนดัคเตอร์ที่มีราคาแพงมาก การจะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นอยู่ในเกณฑ์ดังกล่าวได้นั้น จะต้องมีการศึกษาวิจัยทางทฤษฎีอย่างถูกต้องเป็นเครื่องนำทางเสียก่อน

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์ของไหลสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินหาศักยภาพและประสิทธิภาพของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์

2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิศวกรออสเตรเลียได้นำข้อมูลการปฏิบัติการของโรงงานต้นแบบในสเปน ไปวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการออกแบบให้เหมาะสมกับประเทศออสเตรเลีย [5] แต่เอกสารนี้ไม่ได้ให้ข้อมูลทางวิชาการมากนักเพราะส่วนใหญ่เป็นข้อมูลทางการจัดการ

นักวิจัยท่านอื่นๆ ได้ทำการศึกษาทางทฤษฎีโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินหาประสิทธิภาพของปล่องลมแสงอาทิตย์เป็นฟังก์ชันของตัวแปรที่สำคัญต่างๆ ปรากฏว่านักวิจัยแต่ละกลุ่มได้ข้อสรุปทางทฤษฎีที่แตกต่างกันมาก เช่นบางท่านทำนายว่าประสิทธิภาพของระบบอยู่ในเกณฑ์ 1 % แต่บางท่านก็ทำนายว่าอยู่ในเกณฑ์ 20-30% ความแตกต่างอย่างมหาศาลของผลการศึกษาของนักวิจัยแต่ละท่านบ่งบอกว่าความเข้าใจพื้นฐานของการทำงานของระบบนี้ยังไม่เป็นที่กระจ่าง และยังต้องการการวิจัยเพื่อความกระจ่างเพิ่มเติมในอีกหลายแง่มุม

Mullett [6] ได้ใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์ของไหลเบื้องต้นทำการประเมินหาประสิทธิภาพระบบ ขั้นตอนและสมมุติฐานในการสร้างสมการของเอกสารวิจัยนี้มีข้อที่น่าสังเกตหลายประการ เช่น การสมมุติให้ความแตกต่างของความดันในปล่องลมเป็นความแตกต่างระหว่างความดันที่ยอดปล่องกับความดันบรรยากาศที่ระดับพื้นดิน โดยละเลยความแตกต่างระหว่างความดันบรรยากาศที่ระดับพื้นดินกับความดันที่ฐานปล่องลม ซึ่งการละเลยนี้อาจนำไปสู่ความผิดพลาดในการจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มาก ทั้งนี้เพราะความแตกต่างของความดันในระบบน้อยมากอยู่แล้ว

ในอีกประการหนึ่ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษานี้ได้ประเมินหาความเร็วลมในปล่องลมโดยการพิจารณาให้พลังงานจลน์ของลมที่ยอดปล่องเท่ากับงานที่ใช้ไปในการยกคอลัมน์ของอากาศจากระดับพื้นดินสู่ยอดปล่อง แบบจำลองนี้สมมุติโดยปริยายว่าความเร็วลมที่ฐานปล่อง(และพลังงานจลน์)มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วลมที่ฐานปล่องมีความเร็วเท่ากันกับความเร็วลมที่ยอดปล่อง (ตามกฎอนุรักษ์มวลของของไหล)

นอกจากนี้ แบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของการไหลตัวภายใต้หลังคาแสงอาทิตย์ และไม่ได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากแสงอาทิตย์สู่อากาศ แต่สมมุติให้อากาศร้อนขึ้นเป็นอุณหภูมิตามที่กำหนดโดยทันที ซึ่งเป็นผลให้ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนและการไหลซึ่งโดยแท้จริงแล้วเป็นไปอย่างต่อเนื่องและเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้เกิดการไหลตัวของอากาศในระบบ

Padki และคณะ [7, 8, 9] และ [10] ทำการศึกษาโดยการจำลองและนำเอาผลการจำลองทาง

คณิตศาสตร์มาใช้ โดยแบบจำลองได้สังเคราะห์ขึ้นมากจากสมการอนุพันธ์ทางกลศาสตร์ของไหล การหาคำตอบให้แก่แบบจำลองมีทั้งการหาคำตอบโดยเชิงทฤษฎีแบบประมาณการ และโดยกรรมวิธีเชิงตัวเลข แต่กระบวนการสร้างสมการแม่บทมีข้อสมมุติฐานที่ควรพิจารณาในหลายๆ ประเด็น เช่น

1.สมการเหล่านี้ไม่มีพจน์ของความร้อนที่อากาศรับเข้ามาจากแสงอาทิตย์ แต่จะสมมุติให้อากาศร้อนขึ้นระดับหนึ่งแล้วแต่จะกำหนด ซึ่งก็เป็นความไม่สมจริงตามธรรมชาติเช่นเดียวกันกับ Mullett

2.การสมมุติให้อากาศร้อนมีความเร็วโดยการลอยตัวแบบการพาความร้อนธรรมชาติ จากความเร็วศูนย์เป็นความเร็วสูงสุดได้ภายในระยะทางสั้นๆ จากพื้นดินถึงฐานปล่องด้านล่างเท่านั้น ซึ่งในทางเป็นจริงนั้นอากาศร้อนเร่งตัวจากปากทางเข้าหลังคารับแสงอาทิตย์จนเป็นความเร็วสูงสุดที่ฐานปล่อง

3.การวิเคราะห์แบบแยกส่วน เช่น แยกการพิจารณาการไหลในปล่องออกจากการไหลใต้หลังคา ซึ่งทำให้ขาดการปฏิสัมพันธ์ของการไหลตัวในอุปกรณ์เหล่านั้น

หากพิจารณาว่า โดยแท้จริงแล้วอากาศสามารถไหลตัวไปได้ในระบบปล่องลมแสงอาทิตย์นี้เป็นเพราะเกิดความแตกต่างของความดันสถิตย์ (Hydrostatic Pressure) ในระบบ ซึ่งความแตกต่างนี้มีค่าน้อยมาก (เพียงประมาณ 1% ของความดันบรรยากาศเท่านั้น) ดังนั้น ความผิดพลาดในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แม้เพียงเล็กน้อย ก็อาจจะเป็นสัดส่วนของการผิดพลาดที่มีปริมาณมากได้ นั่นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลลัพธ์บางประการที่ได้จากการวิเคราะห์เหล่านี้ค่อนข้างขัดแย้งต่อสามัญสำนึกเช่น

1.ประสิทธิภาพของปล่องลมเพิ่มขึ้นอย่างมากเพียงเพราะการทำปลายปล่องให้ลู่เข้าเท่านั้นเอง ซึ่งหากทำการวิเคราะห์แบบองค์รวม (ที่ให้อุปกรณ์ต่างๆ มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน)อาจไม่เป็นความจริงตามนี้ เพราะปลายปล่องที่ลู่เข้าย่อมส่งผลต่อการไหลตรงทางเข้าหลังคารับแสงอาทิตย์ด้วย เนื่องด้วยการไหลเป็นแบบความเร็วต่ำกว่าเสียง

2.ประสิทธิภาพของระบบไม่แปรเปลี่ยนมากนักกับความสูงของปล่อง ซึ่งหากเป็นเช่นนี้จริงก็จะทำให้สามารถใช้ปล่องเตี้ยๆ ได้ แม้เพียง 10 เมตร หรืออาจจะถึงกับไม่ต้องการปล่องเลย

ส่วนใน Yan และคณะ [11] มีการจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างกว้างขวางกว่าแหล่งอื่น แต่สมมุติให้ความดันของการไหลภายใต้หลังคารับแสงอาทิตย์เปลี่ยนไปด้วยเพราะความผิดเท่านั้น ซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วควรต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนของพื้นที่หน้าตัดการไหล และผลจากการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วย นอกจากนี้ก็ยังใช้หลักการพิจารณาความเท่ากันของพลังงานจลน์ที่ปลายปล่องกับงานที่ใช้ยกคอลัมน์ของของไหลขึ้นปล่องเหมือนดังในการศึกษาของ Mullett

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้มีจุดเด่นที่แตกต่างจากแบบจำลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ ในอดีตในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์แบบองค์รวม (ไม่แยกส่วน) เพื่อที่อุปกรณ์ทุกชิ้นในระบบจะได้มีปฏิสัมพันธ์ต่อกันตามธรรมชาติ

2.สมมุติฐานต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง หรือการวิเคราะห์ใดๆ มีการประเมินหาค่าความผิดพลาดจากสมมุติฐานเหล่านั้นด้วย

3.ให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรงต่ออากาศที่กำลังไหลตัว โดยไม่มีการสมมุติให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ตามใจชอบ

สามารถทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

จากสมการ Integral momentum equation ในปล่องลมซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดคงที่

$$(p_3 - p_4)A - \rho_3 ghA - F_f = \dot{m}(v_4 - v_3) \qquad (1)$$

ค่าตัวห้อย 1, 2, 3, 4 คือตัวเลขบ่งตำแหน่งที่ต่างๆ ดังในรูปที่ 1 ในการศึกษาเบื้องต้นนี้จะศึกษาเฉพาะปล่องลมเปล่าที่ยังไม่มีการติดตั้งกังหันเทอร์ไบน์ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 จึงเป็นตำแหน่งเดียวกัน ค่า F_f คือแรงต้านทานการไหลจากผนังท่อ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมากเนื่องจากค่าตัวเลขความยาวหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) มีค่าต่ำกว่า 50 และเนื่องจากในขั้นการพิจารณาเบื้องต้นนี้นี้สมมติให้ปล่องลมมีหน้าตัดคงตัวและการไหลตัวเป็นแบบไม่สามารถอัดตัวได้ v_4 จึงเท่ากับ v_3 จึงทำให้พจน์ทางขวามือเป็นศูนย์

ในการวิจัยขั้นต้นนี้จะยังไม่พิจารณาว่ามีกังหันเทอร์ไบน์ ดังนั้น

$$p_3 = p_2 \quad , \text{และ}$$
$$p_3 = p_1 + (p_3 - p_1)$$
$$= p_1 + \Delta p$$

แต่สามารถหา p_1 ได้ในเทอม p_∞ โดยการใช้สมการ Bernoulli ซึ่งทำให้สามารถเขียน p_3 ได้ใหม่ดังนี้

$$p_3 = p_\infty - \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \Delta p \qquad (2)$$

และจากสมการของการเปลี่ยนความดันสถิตย์

$$p_4 = p_\infty - \rho_\infty g h \qquad (3)$$

เมื่อ p_∞ คือ ความดันบรรยากาศนิ่งที่ระดับพื้นดิน

จากนั้นนำสมการ (2) และ (3) เข้าไปแทนค่าในสมการ (1) จะได้

$$\frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 - \Delta p + gh\Delta\rho + gh\delta\rho = 0 \qquad (4)$$

เมื่อ, $\Delta\rho = \rho_3 - \rho_1, \delta\rho = \rho_1 - \rho_\infty$

จากการผสมผสานและปรับแปลงสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน และ equation of state สำหรับอากาศแบบอัดตัวได้ในอุดมคติ [12] สามารถคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของความดัน และความหนาแน่น โดยคำนึงถึงทั้งการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดการไหลและการส่งถ่ายความร้อนให้แก่ของไหล (q) ได้ดังนี้

$$\Delta p = \int_1^3 \frac{\rho v^2}{1-M^2}\left(\frac{dA}{A} - \frac{q}{C_p T}\right) \qquad (5)$$

เมื่อ M คือ Mach Number, A คือพื้นที่หน้าตัดของการไหลได้หลังคารับแสงอาทิตย์ (ซึ่งในที่นี้คือเส้นรอบวงคูณด้วยความสูงของหลังคา) และ q คือ อัตราการให้ความร้อนแก่อากาศต่อหน่วยมวลในช่วงพื้นที่หลังคาที่รองรับการเปลี่ยนแปลงของ dA ซึ่งสามารถเขียน q ใหม่ได้ดังนี้

$$q = \frac{Q dA_r}{\dot{m}}$$

เมื่อ Q เป็นความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ $\dot{m}$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศ และ A_r คือพื้นที่ของหลังคา จึงสามารถเขียนสมการ (5) เสียใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta p = \int_1^3 \frac{\rho v^2}{1-M^2}\left(\frac{dA}{A} - \frac{Q dA_r}{\dot{m} C_p T}\right) \qquad (6)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถสร้างสมการ $\Delta\rho$ ได้ดังนี้

$$\Delta\rho = \int_1^3 \left[\frac{\rho M^2}{1-M^2}\frac{dA}{A} - \frac{\rho}{1-M^2}\frac{Q dA_r}{\dot{m} C_p T}\right] \qquad (7)$$

เมื่อนำสมการ (6), (7) แทนค่าลงไปในสมการ (4) พร้อมทั้งทำการปรับแปลงสมการให้อยู่ในรูปของตัวแปร $\dot{m}$ และ v_3 และตัวแปรอื่น ๆ ที่เหมาะสมจะได้สมการ

$$\frac{1}{2}\rho_1 \dot{m}\left(\frac{v_3 A_3}{A_1}\right)^2 - \dot{m}^2 \int_1^3 \frac{dA}{\rho A^3 (1-M^2)} + \dot{m}^2 \int_1^3 \frac{Q dA_r}{\rho A^2 (1-M^2) C_p T} + \dot{m} g h \int_1^3 \frac{\rho M^2}{1-M^2}\frac{dA}{A} - gh \int_1^3 \frac{\rho}{1-M^2}\frac{Q dA_r}{C_p T} + \dot{m} g h \delta\rho = 0 \qquad (8)$$

สมการ (8) นี้คือสมการพื้นฐานที่สำคัญ เพราะเป็นสมการที่รวมเอาปฏิสัมพันธ์ของอุปกรณ์ทุกตัว (ยกเว้นเทอร์ไบน์) เข้าไว้ด้วยกัน

จุดประสงค์ประการหนึ่งของงานวิจัยนี้คือการหาคำตอบให้แก่สมการ (8) นี้ ซึ่งเป็นสมการอินทิกรัลด้วยกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ข้อสมมุติฐานต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์เข้ามาช่วย ทั้งนี้เพื่อหาค่า $\dot{m} v_3^2/2$ ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานจลน์รวมของการไหลตัวของอากาศร้อน เมื่อได้ค่านี้แล้ว จะสามารถปรับตัวแปรของการออกแบบต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่า $\dot{m} v_3^2/2$ สูงสุดได้

4. คำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการที่จำลองมาได้นี้เป็นสมการอินทิกรัลไม่เชิงเส้นที่ยังเป็นเชิงซ้อน กล่าวคือ ยังมีตัวแปรอื่นๆ ปะปนอยู่ในสมการ ทำให้ต้องแก้สมการนี้ร่วมกับสมการอื่นๆ ด้วยจึงจะหาคำตอบได้ การจะทำเช่นนั้นได้ต้องใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลขที่ค่อนข้างยุ่งยาก ในขั้นนี้จะทำการประมาณการเชิงวิศวกรรม เพื่อหาคำตอบอย่างง่ายให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้

แนวทางที่ใช้ในการประมาณการคือ ข้อสมมุติฐานต่างๆ ที่จะใช้จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในเชิงอนุรักษ์เท่านั้น (Conservative Error) กล่าวคือ ข้อผิดพลาดจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ที่ประเมินได้น้อยกว่าความเป็นจริง ข้อสมมติฐานที่จะใช้ในการประเมินมีดังนี้คือ

1. การไหลตัวเป็นแบบความเร็วต่ำมาก ค่าเลขมัค (Mach Number) จึงมีค่าใกล้ศูนย์
2. ค่าความหนาแน่นอากาศเป็นค่าคงตัว ซึ่งหากพิจารณาอย่างผิวเผินอาจเห็นว่าเป็นข้อสมมุติฐานที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากการไหลตัวของอากาศในระบบเกิดขึ้นได้เพราะความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งทำให้เกิดแรงลอยตัว แต่การประมาณการเช่นนี้จะใช้เฉพาะกรณีที่มีการคูณของความหนาแน่น

เข้ากับพจน์อื่นเท่านั้น และไม่ได้ใช้ในการประมาณหาค่าความแตกต่างของความดันโดยตรง จึงทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยมาก เพราะความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงน้อย

3. อุณหภูมิของการไหลมีค่าคงที่ที่ตรงทางเข้า หรือ ค่าคงที่ที่ตรงทางออก แล้วแต่ว่าใช้ค่าใดแล้วทำให้เกิดการผิดพลาดแบบอนุรักษ์ การประมาณการเช่นนี้แตกต่างจากงานวิจัยในอดีตของนักวิจัยท่านอื่น เพราะงานวิจัยนี้ได้พิจารณาให้มีความร้อนไหลผ่านเข้ามาอย่างต่อเนื่องตลอดการไหลภายใต้หลังคารับแสงอาทิตย์ ที่ต้องมีการสมมติเช่นนี้ก็เพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นตัวเลขนั่นเอง
4. ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิตรงทางออก ให้ประเมินค่าเป็นอุณหภูมิตรงทางเข้าบวกด้วย 50 องศาเซลเซียส (ด้วยเห็นว่าค่า 50 องศาเป็นค่าที่ใหญ่กว่าความเป็นจริงเล็กน้อย ทำให้เกิดความผิดพลาดแบบอนุรักษ์)
5. ตัดพจน์ $\delta\rho$ ออกจากแบบจำลองได้ เพราะน่าจะมีค่าน้อย และเป็นความผิดพลาดแบบอนุรักษ์ ($\delta\rho < 0$)
6. ใช้ความสัมพันธ์ของ Ideal Gas ในการหาค่า Mach Number คือ

$$M^2 = \frac{v^2}{\gamma RT}$$

เมื่อนำเอาสมมุติฐานต่างๆ ดังกล่าวใส่เข้าไปในสมการ (8) โดยใช้สมการอนุรักษ์มวล $\dot{m} = \rho A v$ แปลงค่า v_3 ให้เป็น v_1 จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{1}{2}\dot{m}v_1^2\left[\rho_1 - 2\rho_1 A_1^2\int_1^3\frac{dA}{A^3} + \frac{2A_1\dot{Q}}{v_1 C_p T_1}\int_1^3\frac{dA_r}{A^2} + \frac{2A_1^2\rho_1 gh}{\gamma RT_1}\int_1^3\frac{dA}{A^3}\right] = \frac{\rho_1 gh\dot{Q}}{C_p T_3}\int_1^3 dA_r \qquad (9)$$

สามารถที่จะอินทิเกรตพจน์ต่างๆ ใน (9) ออกมาได้โดยง่ายหากทราบค่าคุณลักษณะต่างๆ ของปล่องลมแสงอาทิตย์และสภาพภูมิอากาศ เช่น ขนาดหลังคา ความสูงจากพื้นดินของหลังคา ขนาดและความสูงปล่อง ค่าความเข้มของพลังงานแสงแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถที่จะแก้สมการหาค่าตัวแปร v_1 ได้หากจัดสมการให้อยู่ในรูป

$$C_1 v_1^3 + C_2 v_1^2 = C_3 \qquad (10)$$

เมื่อ

$$C_1 = \frac{\rho_1^2 A_1^3}{2A_3^2} + \frac{\rho_1^2 A_1 gh}{2\gamma RT}\left[1 - \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2\right] \qquad (11)$$

$$C_2 = \frac{\rho_1 A_1^2 \dot{Q} \ln D/d}{2\pi h_r^2 C_p T_1} \qquad (12)$$

$$C_3 = \frac{\rho_1 gh\dot{Q}A_r}{C_p T_3} \qquad (13)$$

เมื่อ D และ d คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหลังคาและปล่องลมตามลำดับ

สามารถแก้สมการ (10) เพื่อหาค่า v_1 ได้โดยใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลขของนิวตัน-ราฟสัน ด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาคำตอบ

คำตอบที่ได้ได้ทำการพล็อตเป็นสองลักษณะคือ การพล็อตหาพลังงานจลน์ ($\dot{m}v_3^2/2$) ที่ตอปล่องเทียบกับความสูงของปล่อง โดยมีขนาดของหลังคารับแสงอาทิตย์เป็นตัวแปรประกอบ (รูปที่ 2)

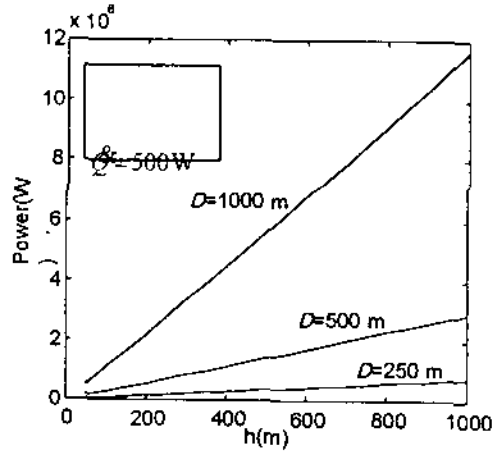

Figure 2: Energy produced at various chimney heights (h) and roof diameters (D)

และ การพล็อตหาประสิทธิภาพ (η) เทียบกับความสูงของปล่องโดยมีทั้งขนาดของหลังคารับแสงอาทิตย์ (รูปที่ 3) และขนาดของปล่องลม (รูปที่ 4) เป็นตัวแปรรอง

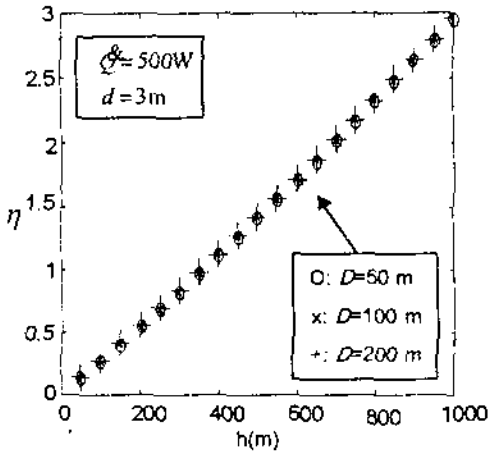

Figure 3: Mechanical Efficiency (η, %) at various chimney heights (h) and roof diameters (D)

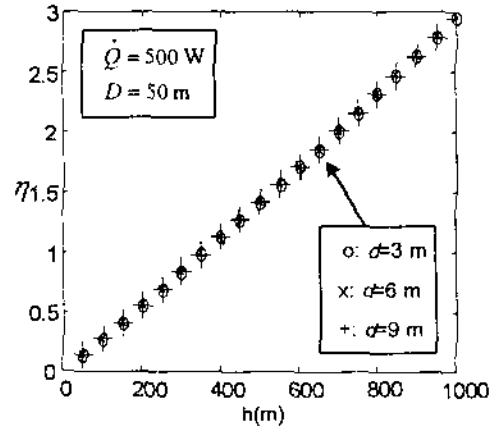

Figure 4: Mechanical Efficiency (η, %) at various chimney heights (h) and chimney diameters (d)

5. การวิจารณ์ผลลัพธ์ที่ได้

จะเห็นได้จากรูปทั้ง 3 ว่าการแปรผันมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง แต่จากการวิเคราะห์พบว่าไม่เป็นเส้นตรงเสียทีเดียว เพียงแต่ความโค้งมีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากการพล็อต

รูปที่ 2 บ่งให้เห็นว่าพลังงานที่ผลิตได้แปรผันโดยตรงกับความสูงของปล่อง และปริมาณพลังงานจะแปรผันยกกำลังสอง (โดยประมาณ) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลังคารับแสงอาทิตย์ ข้อที่น่าสังเกตคือ ที่ความสูงปล่อง 200 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางหลังคาแสงอาทิตย์ 250 เมตร (ซึ่งมีขนาดประมาณเท่ากับโรงงานต้นแบบของวิศวกรเยอรมัน) จะผลิตพลังงานกลของไหลได้ประมาณ 100 กิโลวัตต์ ซึ่งหากสามารถสร้างกังหันเทอร์ไบน์ให้ได้ประสิทธิภาพ 50% และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 80 % ก็ย่อมจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 40 กิโลวัตต์ และมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ประมาณ 0.2 % (0.5 x 0.5 x 0.8 : จากรูปที่ 3)

แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าโรงงานต้นแบบของวิศวกรเยอรมันมีประสิทธิภาพเพียงประมาณ 0.05% เท่านั้น (น้อยกว่าการประเมินนี้ 4 เท่า) ซึ่งบ่งให้เห็นว่าอาจมีการสูญเสียมากในการออกแบบ เช่นตำแหน่งของเทอร์ไบน์อาจไม่เหมาะสม เพราะตั้งอยู่ในแนวที่อากาศมีการเบี่ยงเบนตัวมาก ซึ่งทำให้ยากแก่การออกแบบปีกกังหันให้มีประสิทธิภาพสูงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานต้นแบบนี้ใช้กังหันลมแบบแกนนอนธรรมดาที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อการนี้โดยเฉพาะ

จะเห็นได้จากรูปที่ 3 ว่าลักษณะโดยทั่วไปคือประสิทธิภาพของระบบจะสูงขึ้นเป็นสัดส่วนเกือบโดยตรงกับความสูงของปล่อง น่าสังเกตว่าค่า η ไม่แปรผันกับ D เพราะค่า η ที่ D ต่างๆ ทับกันเป็นจุดเดียวดังที่เห็นในรูปที่ 3

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าขนาดของปล่องที่เปลี่ยนไป ไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพ (แต่พึงเข้าใจว่าประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึง ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานกลของของไหล มิใช่ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า) และหากพล็อตรูปที่ 3 และ 4 ในรูปเดียวกันก็จะได้เส้นกราฟที่ซ้อนทับกัน(เกือบ)พอดี เหตุที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะพจน์ที่ 2 ทางขวามือในสมการ (11) และ C_2 ในสมการ (12) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรกทางขวามือของสมการ (11)

ประเด็นที่ควรสังเกตต่อไปคือประเด็นประสิทธิภาพ ได้ทำการทดลองเชิงตัวเลขให้ปล่องลมสูงขึ้นเรื่อยๆ ค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้ก็จะสูงขึ้นตาม จนในที่สุดมีประสิทธิภาพเกินหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งบ่งให้เห็นข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้นำค่าความหนืดของของไหลมาคำนวณด้วย ในทางเป็นจริงนั้นในย่านการไหลนี้ค่าเลขเรโนลส์ (Reynolds Number) จะสูงกว่าค่าวิกฤตของการปั่นป่วนมาก ทำให้การไหลมีการสูญเสียจากการปั่นป่วน และเมื่อปล่องสูงขึ้นก็จะยิ่งมีพื้นที่ผิวต้านทานการไหลมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงในระดับหนึ่ง และยิ่งไปกว่านั้น การประมาณการที่ให้ค่าเลขมัคเป็นค่าที่น้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ก็จะไม่เป็นความจริงอีกต่อไป ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพด้วย เพราะจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวความเร็วสูงขึ้นดังที่ปรากฏในสมการ (8) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการไหลแบบความเร็วสูงในท่อนั้น ความเร็วสูงสุดที่จะพึงมีได้คือความเร็วเสียง ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ในสมการ (8) พุ่งเข้าสู่ค่าอนันต์ ทำให้ประสิทธิภาพตกลงมาก และจุดนี้ก็จะเป็นจุดกำหนดประสิทธิภาพสูงสุดที่จะพึงมีได้ของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ด้วย ทั้งนี้ไม่ว่าจะนำความหนืดของของไหลมาคิดหรือไม่ก็ตาม

6. สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลของอากาศร้อนในระบบปล่องลมแสงอาทิตย์นี้มีความยุ่งยากพอสมควร แต่สามารถประมาณการหาคำตอบเชิงวิศวกรรมได้ ซึ่งทำให้สามารถที่จะทำนายศักยภาพและประสิทธิภาพของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ได้ คำตอบที่ได้ บ่งให้เห็นถึงศักยภาพของระบบปล่องลมแสงอาทิตย์ที่ไม่ควรมองข้ามในการใช้เป็นทางเลือกในการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ การศึกษาในที่นี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น การศึกษาขั้นต่อไปจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น เพื่อหาแนวทางในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ผ่านกองอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพรสวรรค์ ทองใบ ที่ให้การช่วยเหลืออย่างดียิ่งในการจัดทำบทความนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Schlaich, et al, "Solar Chimneys," Encyclopedia of Physical Science and Technology, 1990 Yearbook, Academic Press, pp. 513-520

[2] McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology, 1994, pp. 356-358

[3] R. Richards, "Hot Air Starts to Rise Through Spain's Solar Chimney," Electrical Review, Vol. 210, No. 15, April 1982, pp.6-27

[4] H. Lautenschlager, et. al, "New Results from the Solar Chimney Prototype and Conclusions for Large Power Plants," European Wind Energy Conference, Hamburg, FRG., Oct 1984, pp. 231-235

[5] A. Luzzi, et. al, "Solar Chimney Power Plant for Australia," Oct. 1993, in Proceeding of a conference sponsored by the ASEAN Sub-Committee on Non-Conventional Energy Research (SCNCER), pp. 605-610

[6] L.B. Mullett, "The Solar Chimney - Overall Efficiency, Design and Performance," International Journal of Ambient Energy, Vol. 8, No. 1, 1987, pp. 35-40

[7] M.M. Padki, S.A. Sherif, "Fluid Dynamics of Solar Chimney," Presented at The Winter Annual Meeting of ASME, Chicago, Illinois, 1988, pp. 43-46

[8] M.M. Padki, S.A. Sherif,"Solar Chimney for Medium-to-Large Scale Power Generation," Proceedings of The Manila International Symposium on the Development and Management of Energy Resources, Jan 1989, pp. 432-443

[9] M.M. Padki, et al, "Solar Chimney for Power Generation in Rural Areas," Presented at the Seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources (organized by The Indian Institute of Metals), Jan 1989, pp. 91-96

[10] M.M. Padki and S.A. Sherif, "A Mathematical Model for Solar Chimneys," Proceedings of the 1992 International Renewable Energy Conference, Vol.1 June 1992, pp. 289-294

[11] M.Q. Yan, et al, "Thermo-Fluid Analysis of Solar Chimney," Presented at The Winter Annual Meetingof The American Society of Mechanical Engineers, Atlanta, Georgia, Dec 1991, pp. 125-130

[12] A.M. Kuethe and J.D. Schetzer, "Foundations of Aerodynamics," John Wiley & Sons, 1964, pp. 159-161