

คณะผู้ดำเนินการวิจัย ดร.ตุจดาว ศรีสำราญ | คุณเอก เอื้อตระกูลวิวัฒน์ หน่วยงานสังกัด หน่วยจ่ายกลางโรงพยาบาลระยอง

บทคัดย่อ (THAI ABSTRACT)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave ขนาด 600 ลิตร ณ CSSD รพ.ระยอง โดยประยุกต์ใช้หลักการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery) จากไอน้ำทิ้งช่วง Exhaust Phase ซึ่งมีพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat) สูงมาอุ่นน้ำป้อน (Feed Water Pre-heating)

ผลการศึกษา: การอุ่นน้ำป้อนช่วยลดภาระ Sensible Heat ส่งผลให้ลดไฟฟ้าลง 22% ต่อรอบ, ลดเวลาทำความร้อนลง 31.4% และลดค่าไฟฟ้าหม้อต้มรายเดือนได้สูงสุด 49,085 บาท นโยบาย SECA และเกณฑ์ GCHC

คำสำคัญ: เครื่องอัตโนมัติ, ไอน้ำทิ้ง, การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่, การอุ่นน้ำป้อน

ABSTRACT (ENGLISH)

This research investigates electrical energy reduction in 600L autoclaves at Rayong Hospital CSSD via Waste Heat Recovery (WHR) during the exhaust phase. Heat from discharged steam is transferred via a heat exchanger for feedwater pre-heating before the boiling process.

Results: Pre-heating reduces sensible thermal load, achieving a 22% energy reduction per cycle, 31.4% shorter heating time, and a 49.08% drop in monthly boiler cost, advancing Green Hospital standards.

Keywords: Autoclave, Waste Steam, Heat Recovery, Feedwater Pre-heating

บริบทCSSDและปัญหาพลังงานทิ้ง

ภาระงานสูง เครื่อง Autoclave ขนาด 600 ลิตร จำนวน 5 เครื่องให้บริการฆ่าเชื้อเครื่องมือผ่าตัด ด้วยไอน้ำอ้อมตัว 121-134 C

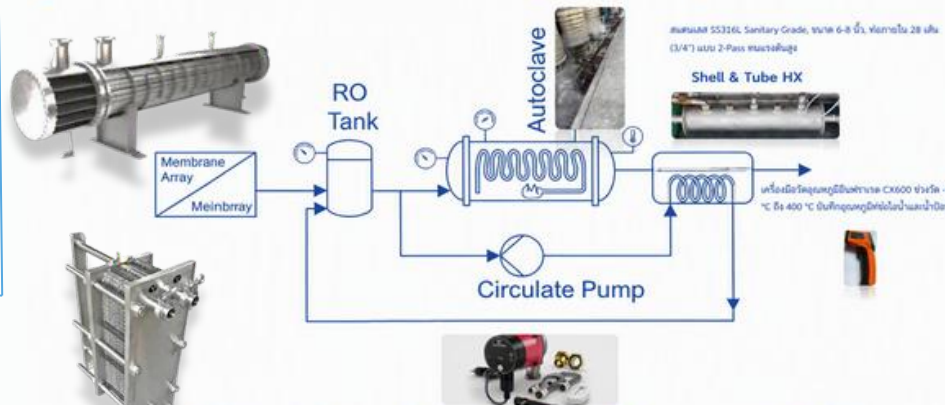
การสูญเสียพลังงาน ช่วง Exhaust Phase ป้อนไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความร้อนแฝง (Latent Heat) สูงออกสู่บรรยากาศ และ

บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์

ผลกระทบ ค่าไฟฟ้าค่าน้ำ (Boiler)สูงเป็นอันดับต้นๆของโรงพยาบาล และเพิ่มความร้อนสะสมในพื้นที่ทำงาน



แผนกายภาพการติดตั้งระบบและวงจรน้ำ RO



ผังการติดตั้งระบบแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับเครื่อง Autoclave และถังพักน้ำ RO

บันทึกอุณหภูมิรายนาที่ช่วง Exhaust Phase (10นาที่)

นาที่	อุณหภูมิไอน้ำเข้า HX (T _{h.in}) (°C)	อุณหภูมิไอน้ำออก HX (T _{h.out}) (°C)	อุณหภูมิไอน้ำเข้า Autoclave (T _{c.in}) (°C)	อุณหภูมิไอน้ำออก Autoclave (T _{c.out}) (°C)	หมายเหตุ
0	121.0	45.0	28.5	28.5	เริ่มระบายไอน้ำทิ้ง
1	115.5	42.3	28.5	35.2	-
2	108.2	40.1	28.5	42.8	-
3	102.4	38.5	28.5	51.4	อัตราแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุด
4	95.8	37.2	28.5	58.7	-
5	88.3	36.5	28.5	63.2	-
6	82.1	35.8	28.5	66.8	-
7	75.4	35.2	28.5	69.5	-
8	68.9	-	-	71.2	-
9	62.5	34.3	28.5	72.5	-
10	55.0	34.0	28.5	73.4	จบช่วง Exhaust

ไอน้ำระบายความร้อนลดลง 121.0 °C → 55.0 °C
(ΔT = 66.0 °C)

อุณหภูมิไอน้ำป้อนเพิ่มขึ้นรวม 28.5 °C → 73.4 °C
(ΔT = +44.9 °C)

ระยะเวลาการทำความร้อน 10 นาที
(Exhaust Phase Complete)

วิเคราะห์จุดอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุด (Heat Transfer Rate)

1. อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

นาที่ 0 → 1 ΔT = 6.7°C
นาที่ 1 → 2 ΔT = 7.6°C

นาที่ 2 → 3 (Peak Rate) ΔT = 8.6°C

นาที่ 3 → 4 ΔT = 7.3°C

อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (ΔT) ช่วงนาที่ 2-3 มีความชันสูงสุด

ถึงพลังงานไอน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ อัตราเร็วสูงสุดที่นาที่ 3

2. จุดตัดในนาที่ที่ 2

Crossover Point

ณ นาที่ที่ 2:
T_{h,out} = 40.1°C | T_{c,out} = 42.8°C

จุดตัดบนกราฟเป็นเพียง จุดเปลี่ยนผ่าน (Crossover Point) ที่น้ำป้อนเริ่มอุ่นจนอุณหภูมิ

แรงดันไอน้ำทิ้งที่เข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่มากที่สุด

3. ค่า LMTD & แรงขับเคลื่อน

~ 29.35°C

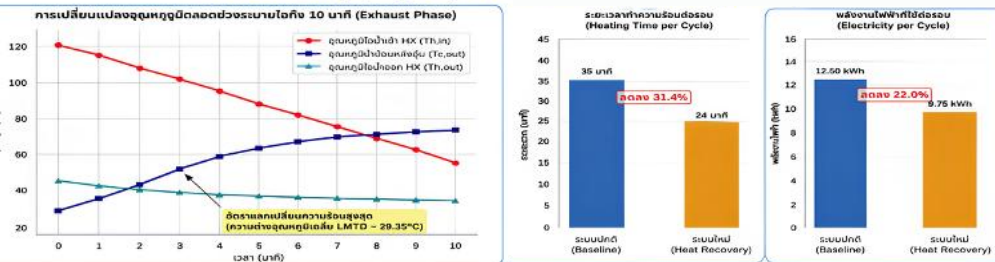
ความต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม (LMTD)

การคำนวณ LMTD เป็นการประเมินแรงขับเคลื่อนความร้อน (Driving Force) ซึ่งเมื่อพิจารณาการนำอัตราการไหล

จริง ณ นาที่ที่ 3 ระบบที่นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

สรุปเชิงวิศวกรรม

จุดที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีที่สุดไม่ได้พิจารณาจากจุดตัดบนกราฟ แต่พิจารณาจากอัตราการถ่ายเทพลังงานจริงซึ่งเกิดขึ้นในนาที่ที่ 3



ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 Sterilization Cycle (Phases)

- Purging Phase: ไล่อากาศเย็นออกจากห้องนึ่งด้วยไอน้ำ
- Heating Phase (Peak Energy): ฮีสเตอร์ทำงานหนักที่สุดเพื่อต้มน้ำป้อนจนเกิดไอน้ำอ้อมตัว 121-134 °C
- Sterilization Phase: รักษาอุณหภูมิและแรงดันคงที่ตามมาตรฐานฆ่าเชื้อ
- Exhaust Phase (Heat Recovery Target): ระบบไอน้ำทิ้ง พลังงานความร้อนแฝงพุ่งสูง ถูกดึงกลับมาใช้ น้ำป้อน

รูปที่ 2.1 แสดงวงจรการทำงานของเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง (Autoclave Cycle) ซึ่งประกอบด้วย 4 ช่วงหลัก ได้แก่ (1) ช่วงไล่อากาศ (Purging Phase) (2) ช่วงทำความร้อน (Heating Phase) ซึ่งมี การบริโภคพลังงานสูงสุด (3) ช่วงฆ่าเชื้อ (Sterilization Phase) และ (4) ช่วงระบายไอน้ำทิ้ง (Exhaust Phase) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่บรรยากาศ และเป็นเป้าหมายหลักของการฟื้นคืนความร้อนในงานวิจัยนี้ จะเห็นได้ว่าในช่วง Exhaust Phase อุณหภูมิและความดันภายในเครื่องจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเปิดวาล์วระบายไอน้ำ ไอน้ำที่ระบายออกมา ในช่วงนี้ยังคงมีพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat) ในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Smith และ Brown (2020) ที่ระบุว่า การจับพลังงานในช่วงเวลาดังกล่าวผ่านเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน จะสามารถนำพลังงานกลับมาเพิ่มอุณหภูมิ น้ำป้อนในรอบถัดไปได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อมาตรฐานการฆ่าเชื้อในเครื่อง

บทที่ 2: สมการการถ่ายเทความร้อนและกฎ LMTD

2.2 กฎการถ่ายเทความร้อนหลัก 3 รูปแบบ

- การนำความร้อน (Conduction): กฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law)

$$q_c = -kA \frac{\Delta T}{L}$$

การนำความร้อน (Conduction): เมื่อผิวสัมผัสในได้กับความร้อน พลังงานจะถูกส่งผ่านเนื้อวัสดุ (เช่น ทองแดง) ไปยังผิวที่เย็นกว่า โดยอัตราขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดและความหนาของวัสดุ (k)

- การพาความร้อน (Convection): กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling)

$$Q = hA (T_s - T_\infty)$$

การพาความร้อน (Convection): เกิดขึ้นเมื่อไอน้ำร้อนไหลผ่านผิวด้านใน และน้ำป้อนใหม่ผ่านผิวด้านนอก พลังงานจะถูกถ่ายเทจากในภาชนะของไอน้ำสู่น้ำป้อนที่เย็นกว่า

- ความร้อนแฝงการควบแน่น (Latent Heat): ความร้อนแฝงของการกลั่นตัว (Latent Heat of Condensation) ซึ่งตามกฎของ Smith และ Brown (2020)

$$Q = m \cdot L$$

การเปลี่ยนสถานะและความร้อนแฝง (Phase Change & Latent Heat): จุดที่สำคัญที่สุดคือไอน้ำในถังหม้อต้มที่เปลี่ยนจากสถานะการกลั่นตัว (Condensation) ไปยังระบาย พลังงานความร้อนแฝงออกมา ทำให้น้ำป้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.3 Log Mean Temperature Difference (LMTD)

สมการคำนวณแรงขับเคลื่อนอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม สำหรับระบบไหลสวนทาง (Counter-flow):

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

2.4 Rule of Thumb: อุณหภูมิไอน้ำป้อนเริ่มขึ้นที่ 6 °C (33 °F) ช่วงลดพลังงานความร้อนได้ประมาณ 1%
U.S. Department of Energy (US DOE) – Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) Steam Tip Sheet #8: Preheat Boiler Feedwater with Waste Heat

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor = 0.351 kgCO₂e/kWh)

ที่มาของตัวเลข 0.351 kgCO₂e/kWh:

- เป็นค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งในประเทศ (Grid Emission Factor) ที่คำนวณจากข้อมูลก๊าซเรือนกระจกหลัก 3 ชนิด (CO₂, CH₄, N₂O) แล้วแปลงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e)
- เมื่อโรงงานสามารถลดการใช้พลังงานได้ 1 kWh จะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.351 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

“ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาและต่อยอดนวัตกรรม”

1. หุ้มฉนวนกันความร้อน

ควรติดตั้งฉนวนกันความร้อน (Insulation) ที่ถังพักน้ำป้อนและท่อทางเดินน้ำร้อนทั้งหมดเพื่อลด Thermal Loss

2. ควบคุมอัตโนมัติ IoT

ประยุกต์ใช้ IoT Sensors วัดอุณหภูมิ และติดตั้ง Zero Export Controller ป้องกันไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ

3. ต่อยอดถึงความร้อน

ใช้น้ำร้อนส่วนเกินในกระบวนการล้างเครื่องมือด้วย Ultrasonic Cleaner เพื่อดึงประสิทธิภาพสูงสุด

5.1 สรุปผลการวิจัย (Key Conclusion)

- บรรลุสมมติฐาน: อุณหภูมิไอน้ำป้อนเพิ่มขึ้น +44.9 °C และลดการใช้ไฟฟ้าได้ 22% ต่อรอบ ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายสมมติฐาน (15%)
- เหตุผลที่ประหยัดได้สูง: ตาม Rule of Thumb เพิ่ม 45 °C ควรประหยัด 7.5% แต่ผลจริง ลดได้ 22% เนื่องจากเกิดการลดระยะเวลาส่วน Warm-up Phase รวมด้วย
- Productivity: Cycle Time สั้นลง 11 นาที ช่วยเพิ่มรอบนึ่งเครื่องมือผ่าตัดต่อวันได้มากขึ้น

จากการทดลองพบว่า การใช้น้ำที่ผ่านการอุ่นแล้ว (Pre-heated Water) สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงจาก 12.50 kWh เหลือ 9.75 kWh ต่อการนึ่ง คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 2.75 kWh ต่อการนึ่ง (ลดลง 22.0%) และเมื่อคำนวณตามแนวทาง ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (TGO) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากสายส่งไฟฟ้า (Grid Emission Factor) เท่ากับ 0.351 kgCO₂e/kWh ตามรายงานของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (EPPO) พบว่าระบบนี้สามารถลด การปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.965 kgCO₂e ต่อการนึ่ง 1 รอบ

5.2 อภิปรายผล (Thermodynamic Discussion)

- พลังงานความร้อนแฝง: การถ่ายเทความร้อนหลักเกิดจาก Phase Change ของไอน้ำช่วง 3 นาทีแรก ซึ่งมี Enthalpy สูงมาก
- LMTD Driving Force: สามารถ Counter-flow สร้างแรงขับอุณหภูมิสูง เกิดการควบแน่น อย่างรวดเร็ว
- SECA & Carbon Footprint: ลดการปล่อย SCO 25 สะสมอย่างเห็นรูปธรรม (Emission Factor 0.0.351 kgCO₂e/kWh)