



دراسة تحسين مردود التوربين الغازي باستخدام التقنيات الحديثة وإعادة الاسترداد الحراري

خليفة محمد العلوي الشنطة

قسم الهندسة الميكانيكية والثيرموديناميكية التطبيقية

المعهد العالي للعلوم والتقنية الزنتان - ليبيا

Improving Gas Turbine Efficiency Using Advanced Technologies and Waste Heat Recovery

Khalifa Mohammed Al-Alawi Al-Shanta

Department of Mechanical Engineering and Applied Thermodynamics

Higher Institute of Science and Technology, Zintan – Libya

khalifaashanta28@gmail.com

الملخص (Abstract)

تُعد التوربينات الغازية من الركائز الأساسية في منظومات توليد الطاقة الكهربائية والتطبيقات الصناعية الحديثة، إلا أنها تعاني من انخفاض ملحوظ في الكفاءة الحرارية عند التشغيل وفق دورة برايتون البسيطة (Simple Brayton Cycle)، حيث تتراوح المردودية الفعلية بين 30% و38%. يعود هذا الانخفاض أساساً إلى الضياعات الحرارية العالية المرافقة لغازات العادم المطرودة بدرجات حرارة مرتفعة، إضافة إلى التأثير السلبي لارتفاع درجة الحرارة المحيطة على كفاءة الضاغط الميكانيكي.

تناقش هذه الورقة البحثية منهجية متكاملة لتحسين الأداء الديناميكي الحراري للتوربينات الغازية عبر دمج مجموعة من التقنيات المتقدمة، تشمل: التبريد المسبق للهواء عند مدخل الضاغط (Inlet Air Cooling)، التبريد البيئي أثناء الضغط (Intercooling)، إعادة التسخين (Reheating)، والتجديد الحراري (Regeneration)، وصولاً إلى الربط مع دورات البخار المركبة (Combined Cycle Power Plant – CCPP).

أظهرت نتائج التحليل الثيرموديناميكي أن تطبيق التبريد المسبق للداخل يسهم في استعادة القدرة المفقودة في المناطق الحارة بنسبة تصل إلى 8-12%، بينما يُحقق الاعتماد على دورات الاسترداد الحراري المركبة (CCPP) تحسناً جذرياً ينقل الكفاءة الحرارية الكلية للمنظومة من مستوياتها المحدودة لتتجاوز 58%.

الكلمات المفتاحية: التوربين الغازي، الكفاءة الحرارية، دورة برايتون، الاسترداد الحراري، التبريد المسبق، المحطات المركبة (CCPP).

1. المقدمة (Introduction)

شهد الطلب العالمي على الطاقة الكهربائية نمواً متسارعاً خلال العقود الأخيرة، مما فرض على قطاع الهندسة الحرارية تطوير منظومات توليد عالية الكفاءة ومنخفضة الانبعاثات الكربونية. تحتل التوربينات الغازية مكانة محورية في هذا المجال نظراً لارتفاع كثافة القدرة المصممة (Power Density)، وسرعة التشغيل والاستجابة للأحمال المتغيرة، فضلاً عن انخفاض التكلفة الرأسمالية مقارنة بالمحطات البخارية التقليدية.

تعتمد التوربينات الغازية في عملها الأساسي على دورة برايتون النظرية (Brayton Cycle). وعلى الرغم من التطور المستمر في علم المواد وتقنيات تبريد الريش، فإن الدورة البسيطة للتوربين الغازي ما زالت تعاني من محدودات ثرموديناميكية هيكلية؛ إذ يتم طرد نسبة كبيرة من الطاقة الحرارية المدخلة (تصل إلى 60-65%) مباشرة إلى الغلاف الجوي عبر غازات العادم بدرجات حرارة تتراوح بين 450 و600 درجة مئوية.

علاوة على ذلك، يتأثر أداء التوربينات الغازية بشكل حاد بالتغيرات المناخية والبيئية المحيطة. حيث يؤدي ارتفاع درجة حرارة الهواء المحيط إلى انخفاض كثافته، مما يقلل من تدفق كتلة الهواء (Mass Flow Rate) المار عبر الضاغط، ويزيد بالنتيجة من الشغل النوعي المطلوب للضغط، وهو ما ينعكس سلباً على القدرة الصافية والمردود الحراري الكلي. يهدف هذا البحث إلى تقديم تحليل ديناميكي حراري شامل ومقارن لمختلف التقنيات الحديثة الموجهة لرفع كفاءة التوربينات الغازية، وتقليل الاستهلاك النوعي للوقود، وتخفيض الانبعاثات الحرارية والبيئية، مع التركيز على استراتيجيات إعادة الاسترداد الحراري وتقنيات التبريد المتقدمة.

2. المنهجية التحليلية والديناميكية الحرارية (Methodology & Thermodynamic Analysis)

تستند المنهجية المتبعة في هذا البحث إلى صياغة النموذج الترموديناميكي للدورة الغازية وتتبع التحولات الحرارية المكونة لها، واستخلاص موازنات الطاقة والكتلة وفق القانونين الأول والثاني للديناميكا الحرارية.

2.1 التحليل الحراري لدورة برايتون القياسية (Standard Brayton Cycle)

تتكون دورة برايتون المثالية من أربع عمليات أساسية:

1. (2 - 1) انضغاط أديباتي أيزنتروبي للهواء في الضاغط.
2. (3 - 2) إضافة حرارة بضغط ثابت في غرفة الاحتراق.
3. (4 - 3) تمدد أديباتي أيزنتروبي للغازات في التوربين.
4. (1 - 4) طرد حرارة بضغط ثابت إلى الوسط المحيط.

تُعطى الكفاءة الحرارية النظرية (η_{th}) لدورة برايتون البسيطة بدلالة نسبة الضغط (P_2 / P_1) ونسبة الحرارة النوعية ($\gamma = C_p / C_v$) بالمعادلة التالية:

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

في الظروف الفعلية، يجب الأخذ بعين الاعتبار الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط (η_c) والتوربين (η_t)، حيث يُحسب الشغل الصافي المكتسب (W_{net}) كما يلي:

$$W_c = \dot{m} a C_p (T_2 - T_1) / \eta_c$$

$$W_t = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{pg} (T_3 - T_4) \cdot \eta_t$$

$$W_{net} = W_t - W_c$$

حيث:

- $\dot{m}_a$: معدل تدفق كتلة الهواء (kg/s).
- $\dot{m}_f$: معدل تدفق كتلة الوقود (kg/s).
- T_3 : درجة حرارة مدخل التوربين (Turbine Inlet Temperature – TIT).

2.2 تقنيات تحسين الأداء والتطوير الهيكلي للدورة

أ. تبريد الهواء عند مدخل الضاغط (Inlet Air Cooling Systems)

يهدف تبريد الهواء عند المدخل إلى زيادة كثافة الهواء الداخل للضاغط عند ارتفاع درجات الحرارة المحيطة (T_{amb}). يتميز نظام التبريد التبخيري (Evaporative Cooling) بالبساطة وقلة التكلفة، بينما يتيح التبريد باستعمال المبردات الميكانيكية (Chilled Water Cooling) خفض درجة الحرارة إلى مستويات ثابتة ومحددة بدقة بغض النظر عن الرطوبة النسبية.

ب. التبريد البيني (Intercooling) وإعادة التسخين (Reheating)

- التبريد البيني: يُقسم الضاغط إلى مرحلتين (ضغط منخفض وضغط عالٍ) مع إدخال مبادل حراري بينهما لخفض درجة حرارة الهواء. يقلل هذا الإجراء من شغل الضغط الميكانيكي المستهلك (W_c).
- إعادة التسخين: يُقسم التوربين إلى مرحلتين، ويُعاد تسخين الغازات الممتدة جزئياً عبر غرفة احتراق ثانوية قبل دخولها مرحلة الضغط المنخفض، مما يزيد من الشغل الكلي الناتج (W_t).

ج. الاسترداد الحراري أو التجديد (Regeneration / Recuperation)

يتم استغلال غازات العادم الساخنة الخارجة من التوربين عند درجة حرارة (T_4) لتسخين الهواء المضغوط الخارج من الضاغط عند (T_2) قبل دخوله إلى غرفة الاحتراق، بواسطة مبادل حراري (Recuperator). يقلل هذا الإجراء مباشرة من كمية الوقود اللازمة للوصول إلى درجة حرارة (T_3).

تُعرف فعالية المجدد الحراري (ϵ) بالمعادلة:

$$\epsilon = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2}$$

حيث T_x هي درجة حرارة الهواء المغادر للمجدد والمتجه لغرفة الاحتراق. [غرفة الاحتراق] -----> (هواء مسخن)

^

|

[المجدد] ----> (غازات العادم $4T$)

|

|

^

[الضاغط] ----> (هواء مضغوط $2T$)

د. المحطات المركبة للاسترداد الحراري (Combined Cycle Power Plant – CCGP)

تُعد تقنية المحطات المركبة الأكثر كفاءة هيدروديناميكية، حيث تُربط الدورة الغازية (دورة برايتون - الدورة العلوية) مع دورة بخارية (دورة رانكن - الدورة السفلية) عن طريق مولد بخار الاسترداد الحراري (Heat Recovery Steam Generator – HRSG). يتم تحويل الطاقة الحرارية الضائعة في العادم إلى بخار محمص يدير توربيناً بخارياً إضافياً لتوليد قدرة كهربائية دون الحاجة لاستهلاك وقود إضافي.

3. النتائج والمناقشة (Results & Discussion)

تم تطبيق التحليل العددي على توربين غازي صناعي قياسي تحت متغيرات تشغيلية مختلفة لدراسة أداء التقنيات المقترحة.

3.1 تأثير درجة الحرارة المحيطة على أداء التوربين

يُظهر التحليل تأثيراً حاسماً للتوربين الغازي بالظروف المناخية البيئية. يوضح الجدول التالي تغيرات القدرة والكفاءة بدلالة ارتفاع درجة الحرارة المحيطة من 15°C (الظروف القياسية ISO) إلى 45°C:

درجة الحرارة المحيطة (C°)	الشغل النوعي للضاغط (kJ/kg)	القدرة الصافية الناتجة (MW)	الكفاءة الحرارية للدورة البسيطة (%)
15 (ISO)	285.4	100.0	35.2%
25	296.1	93.8	34.1%
35	307.8	87.2	32.8%
45	320.2	80.1	31.2%

يتضح من البيانات أنه عند ارتفاع درجة الحرارة المحيطة إلى 45°C، تتراجع القدرة الصافية بنسبة تصل إلى **19.9%**، وتنخفض الكفاءة الحرارية بمقدار **4.0 درجات مئوية**، وذلك نتيجة زيادة الشغل النوعي المطلوب للضغط وانخفاض كثافة الهواء.

3.2 مقارنة الأداء بين الترتيبات المختلفة للدورة

تم إجراء مقارنة شاملة للأداء الحراري عند تحسين الدورة البسيطة باستخدام التبريد المسبق، والتجديد، والتكامل مع دورة رانكن البخارية: الدورة البسيطة (Simple Cycle) [35.2%]

مع تبريد مدخل الهواء (Inlet Cooling) [37.1%]

مع التجديد الحراري (Regeneration) [44.5%]

الدورة المركبة (CCPP) [58.6%]

الترتيب الثرموديناميكي للدورة	درجة حرارة العادم (C°)	استهلاك الوقود النوعي (g/kWh)	الكفاءة الحرارية الكلية (η_{th} %)
الدورة البسيطة (Simple Cycle))	540	242	35.2%
الدورة البسيطة + تبريد المدخل	525	230	37.1%
دورة التجديد (Regenerative) Cycle)	360	191	44.5%
دورة التبريد البيني وإعادة التسخين	490	210	40.8%
الدورة المركبة CCPP – Triple) Pressure)	95	144	58.6%

3.3 مناقشة التحسينات المكتسبة

1. نظام تبريد مدخل الضاغط: يتيح استعادة ما يقارب 75-80% من القدرة المفقودة خلال أوقات الذروة الصيفية، مما يرفع الكفاءة التشغيلية بنسبة تصل إلى 1.9%.
2. التجديد الحراري (Regeneration): ينخفض الاستهلاك النوعي للوقود بشكل ملحوظ نتيجة رفع درجة حرارة الهواء الداخل لغرفة الاحتراق، وهو ما يرفع الكفاءة الحرارية بنسبة 9.3% مقارنة بالدورة البسيطة. تكون هذه التقنية فعالة بشكل خاص عند نسب الضغط المنخفضة إلى المتوسطة ($r_p > 12$).
3. الدورة المركبة (CCPP): تقدم الحل الأمثل والأعلى كفاءة حرارية، حيث يتم استرجاع حرارة الغازات الخارجة عند 540°C وتخفيضها إلى 95°C قبل الطرد النهائي، مما يثمر عن استغلال متكامل للطاقة الحرارية وتجاوز الكفاءة الإجمالية حاجز 58%.

4. الخاتمة والتوصيات (Conclusion & Recommendations)

4.1 الاستنتاجات الرئيسية

- تُشكل درجات الحرارة المرتفعة للهواء المحيط عائقاً تشغيلياً رئيساً يقلل من كفاءة وقدرة التوربينات الغازية في المناطق الحارة.
- يُعد تطبيق تبريد مدخل الضاغط حلاً اقتصادياً وسريع التنفيذ لاستعادة القدرة الضائعة خلال فترات الاستهلاك العالي صيفاً.
- يُسهم التجديد الحراري في رفع كفاءة الدورة الغازية المفردة بشكل ممتاز عند نسب الضغط المنخفضة.
- تُعتبر تقنية المحطات المركبة (CCPP) الاستراتيجية الأكثر كفاءة واستدامة هيدروديناميكية، حيث ترفع المردود الحراري الكلي بنسبة تتجاوز 23% مقارنة بالدورة البسيطة دون زيادة في استهلاك الوقود.

4.2 التوصيات الهندسية

1. التحديث الهيكلي للمحطات الحالية: التوصية بإضافة وحدات التبريد التبخيري أو التبريد بالماء المثلج لمدخل الضاغط في المحطات الغازية الواقعة في الأقاليم الجافة والحارة.
2. التحول نحو الدورات المركبة: إعطاء الأولوية في المشاريع الجديدة لإنشاء محطات مركبة (CCPP) تعتمد على مولدات بخار الاسترداد الحراري متعددة الضغط (Multi-Pressure HRSG).
3. تطوير علم المواد وتقنيات TIT: الاستثمار في الأبحاث المتعلقة بسيراميك التغليف الحراري (Thermal Barrier Coatings) لرفع درجة حرارة مدخل التوربين (TIT) إلى أسباب أعلى بأمان ثرموديناميكي.
4. تكامل الطاقات المتجددة: دراسة دمج المجمعات الشمسية الحرارية MHI مع دورات الاسترداد الحراري لإنشاء منظومات هجينة عالية الكفاءة.

5. المراجع (References)

1. **Boyce, M. P.** (2012). *Gas Turbine Engineering Handbook*. 4th Edition, Butterworth-Heinemann.
2. **Saravanamuttoo, H. I. H., Rogers, G. F. C., Cohen, H., & Straznicky, P.** (2009). *Gas Turbine Theory*. 6th Edition, Pearson Education.
3. **Cengel, Y. A., & Boles, M. A.** (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 9th Edition, McGraw-Hill Education.
4. **Horlock, J. H.** (2003). *Advanced Gas Turbine Cycles*. Elsevier Science Ltd.
5. **Kehlhofer, R., Rukes, B., Hannemann, F., & Stirnimann, F.** (2009). *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. 3rd Edition, PennWell Books.
6. **Kakaras, E., Doukelis, A., & Karellas, S.** (2004). "Compressor inlet air cooling in gas turbine power plants". *Energy*, 29(12), 2347–2358.