



منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبنترول (أوابك)

دراسة

تحسين كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط



نحو مصافي أكثر كفاءة واستدامة
لطاقة أفضل ومستقبل أنظف



رفع الكفاءة
وخفض التكاليف



تحسين الأداء
التشغيلي



تقليل الانبعاثات
والأثر البيئي



تعزيز الاستدامة
والتنافسية

إعداد: المهندس عماد ناصيف مكي

مدير إدارة الشؤون الفنية

دولة الكويت: يوليو 2026





جميع حقوق الطبع محفوظة،

ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2026

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوابك"

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف 00965 24959000

الموقع على الإنترنت: www.oapecorg.org

البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

مقدمة

تحسين كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط

تلعب كفاءة الطاقة دوراً محورياً في جهود خفض الانبعاثات الكربونية بما يتوافق مع التوجه العالمي نحو تحقيق هدف الوصول إلى صفر انبعاثات بحلول عام 2050. ويتركز الاهتمام بشكل أكبر نحو الصناعات الكثيفة استهلاك الطاقة، ومنها صناعة تكرير النفط.

تتضمن الدراسة ثلاثة فصول، يتناول الفصل الأول أهمية تحسين كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط في إطار التوجه العالمي نحو خفض الانبعاثات، والحد من تكاليف التشغيل لمواجهة المنافسة الشديدة في الأسواق العالمية، والعوامل المؤثرة في استهلاك الطاقة. أما الفصل الثاني فيتناول فرص تحسين كفاءة الطاقة في عمليات مصافي تكرير النفط ووحداتها المساندة، ودور التقنيات الحديثة والتحول الرقمي في تحقيق النتائج المنشودة.

كما يتناول الفصل الثالث مكونات وأهداف نظام إدارة الطاقة وانعكاسات تطبيقه على أداء مصافي تكرير النفط. مع بعض الأمثلة والتجارب الناجحة التي نفذتها بعض المصافي العربية والعالمية، والتي تبرز أهمية تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في الحد من الانبعاثات وتمكين المصافي من تلبية متطلبات التشريعات الخاصة بحماية البيئة من التلوث.

خلصت الدراسة إلى أن نجاح تطبيق مشروع تحسين كفاءة الطاقة يستوجب قيام مصافي تكرير النفط بوضع أهداف وأولويات واضحة لخططها المستقبلية، والبدء ببناء أنظمة وقدرات إدارية داخلية تمكنها من تحقيق تحسينات مستدامة في مجال الطاقة.

والله ولي التوفيق

الأمين العام

المهندس/ خالد العتيبي

قائمة المحتويات

iii	مقدمة
4	قائمة المحتويات
6	قائمة الأشكال
8	قائمة الجداول
9	قائمة المصطلحات
10	ملخص تنفيذي
14	الفصل الأول: أهمية ترشيد استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط
14	1-1: المكونات الرئيسية لمصفاة تكرير النفط
16	2-1: مصادر الطاقة المستهلكة في مصافي تكرير النفط
16	3-1: قياس كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط
18	4-1: العوامل المؤثرة في كفاءة الطاقة في مصافي النفط
18	1-4-1: سهولة الحصول على مصادر الطاقة
18	2-4-1: الطاقة التكريرية الفعلية للمصفاة
19	3-4-1: نمط الطلب على المنتجات البترولية
19	4-4-1: نوع عمليات التكرير
20	5-4-1: تطور تقنيات التكرير المستخدمة
20	6-4-1: مواصفات المنتجات
20	7-4-1: نوع النفط الخام المكرر
20	5-1: معوقات تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط
21	1-5-1: عوامل إدارية وتنظيمية
21	2-5-1: ضعف أنظمة القياس والمتابعة
21	3-5-1: قصور في إدارة المعرفة والتدريب
22	6-1: دوافع وفوائد تطبيق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط
22	1-6-1: تحسين هامش الربحية
22	2-6-1: تلبية متطلبات التشريعات البيئية
23	3-6-1: تحسين كفاءة تطبيق برامج الصيانة
24	4-6-1: تحسين صورة الشركة
24	5-6-1: خلق فرص عمل جديدة
25	الفصل الثاني: فرص تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط
25	1-2: تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة
25	1-1-2: التصنيف حسب حجم التكاليف
26	2-1-2: التصنيف حسب نظام الاستخدام
26	3-1-2: التصنيف حسب التأثير على أداء الطاقة
26	4-1-2: التصنيف حسب الهدف الاستراتيجي
28	2-2: تحسين كفاءة عمليات تكرير النفط
28	1-2-2: تقطير النفط الخام Crude Distillation

34.....	2-3-2: عملية التفحيم المؤجل Delayed Coking
36.....	3-3-2: عملية التكسير الحفزي المائع
39.....	4-2: عملية التكسير الهيدروجيني Hydrocracking
40.....	5-2: عملية المعالجة الهيدروجينية Hydrotreating
42.....	6-2: عملية التهذيب الحفزي Catalytic reforming
45.....	7-2: الوحدات المساندة
45.....	1-7-2: منظومة إنتاج الهيدروجين
47.....	2-7-2: أفران العمليات
48.....	3-7-2: المبادلات الحرارية
50.....	4-7-2: شبكة الوقود الغازي
53.....	5-7-2: منظومة توليد وتوزيع بخار الماء
62.....	6-7-2: منظومة تصريف الغازات إلى الشعلة
62.....	7-7-2: منظومة مياه التبريد
67.....	8-7-2: أتمتة منظومة تخزين وتحضير المشتقات النفطية Storage Tanks
68.....	9-7-2: المعدات الدوارة Rotating Equipment
70.....	8-2: تطبيق التقنيات الحديثة
70.....	1-8-2: تطبيق تقنيات التحول الرقمي
74.....	2-8-2: تقنيات تعزيز الكفاءة التشغيلية
74.....	3-8-2: استخدام محفزات متطورة
74.....	4-8-2: كهربة عمليات صناعة التكرير
75.....	5-8-2: استخدام مبادلات حرارية متطورة
76.....	9-2: دمج الطاقة المتجددة مع الوقود الأحفوري في عمليات التسخين
76.....	10-2: تعزيز الوعي بأهمية ترشيد استهلاك الطاقة
77.....	11-2: دراسة حالة: مصفاة ريبسول (إسبانيا)
77.....	1-11-2: المكونات الرئيسية لمشروع مصفاة ريبسول
77.....	2-11-2: الوظائف الرئيسية للنظام
78.....	3-11-2: الفوائد والنتائج المحققة
78.....	4-11-2: عوامل النجاح الرئيسية
78.....	5-11-2: نتائج تنفيذ المشروع
78.....	12-2: دراسة حالة تطبيق فرص تحسين كفاءة الطاقة في مصافي نفط شركة توتال
79.....	1-12-2: تنفيذ مشاريع لتطوير بعض الوحدات الإنتاجية
79.....	2-12-2: تأسيس مركز دعم واستشارات فنية
81.....	13-2: دراسة حالة تحسين كفاءة الطاقة في وحدة معالجة هيدروجينية
83.....	الفصل الثالث: نظام إدارة الطاقة في صناعة تكرير النفط
83.....	1-3: معايير إدارة الطاقة
84.....	2-3: معيار إدارة الطاقة ISO:50001
84.....	1-2-3: الاستخدام المهم للطاقة Significant Energy Use
85.....	2-2-3: الأداء المرجعي للطاقة Energy Baseline

85.....	3-2-3: مؤشرات أداء الطاقة.....
85.....	3-3: تكامل معيار إدارة الطاقة مع نظم الإدارة الأخرى.....
86.....	4-3: مراحل تطبيق نظام إدارة الطاقة.....
86.....	1-4-3: تحديد المسؤوليات والسياسات.....
88.....	2-4-3: صياغة سياسة الطاقة.....
89.....	3-4-3: تقييم الأداء الحالي لاستهلاك الطاقة.....
93.....	4-4-3: تحديد فرص تحسين كفاءة الطاقة.....
94.....	4-4-3: إعداد مؤشرات الأداء الرئيسية.....
99.....	5-4-3: تحديد الأهداف المتوقعة من تنفيذ البرنامج.....
100.....	6-4-3: مرحلة التنفيذ.....
101.....	7-4-3: التحسين المستمر.....
101.....	5-3: عوامل نجاح تنفيذ معيار إدارة الطاقة.....
102.....	1-5-3: توفر خبرة سابقة في تطبيق نظم الإدارة.....
102.....	2-5-3: إعداد هيكل إداري منظم.....
103.....	6-3: فوائد تطبيق معيار إدارة الطاقة.....
103.....	7-3: دراسة حالة تطبيق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل.....
103.....	1-7-3: أهداف برنامج تحسين كفاءة الطاقة.....
103.....	2-7-3: مراحل تنفيذ برنامج إدارة الطاقة.....
108.....	8-3: دراسة حالة: تطبيق نظام إدارة البيئة ISO:50001:2018 في مصفاة سيلاكاب.....
108.....	1-8-3: نتائج تطبيق نظام إدارة الطاقة.....
110.....	2-8-3: خطة تنفيذ البرنامج.....
114.....	9-3: دراسة حالة تطبيق برنامج إدارة كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية.....
117.....	الاستنتاجات والتوصيات.....
118.....	ABSTRACT.....
120.....	المراجع.....

قائمة الأشكال

15	الشكل (1-1): مخطط سير العمليات في مصفاة تكرير النفط
17	الشكل (2-1): تطور استهلاك الطاقة ومؤشر كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية
18	الشكل (3-1): العلاقة بين الطاقة التكريرية الفعلية وكفاءة استهلاك الطاقة في المصفاة
19	الشكل (4-1): الاستهلاك النسبي في عمليات التكرير الرئيسية في مصفاة تكرير النفط
21	الشكل (5-1): أبرز عوامل انخفاض كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط
27	الشكل (1-2): تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط
29	الشكل (2-2): مخطط سير عملية التقطير الجوي
30	الشكل (3-2): مخطط سير عملية التقطير الفراغي

- 30 الشكل (2-4): مخطط فاصل الأملاح الكهربائي
- 31 الشكل (2-5): مخطط مكونات منظومة أعلى برج التقطير وملحقاته
- 33 الشكل (2-6): سلسلة المبادلات الحرارية لتسخين النفط في وحدة التقطير قبل وبعد التعديل
- 33 الشكل (2-7): مخطط الأجزاء الداخلية لعمود التقطير بحشوات متطورة
- 34 الشكل (2-8): مخطط سير عملية التفحيم المؤجل
- 35 الشكل (2-9): طبقة الفحم المترسبة على السطح الداخلي لأنابيب فرن التفحيم المؤجل
- 36 الشكل (2-10): مخطط سير عملية التكسير الحفزي المائع
- 37 الشكل (2-11): منظومة استرجاع الطاقة من غازات تنشيط المحفز في وحدة التكسير الحفزي المائع (FCC)
- 38 الشكل (2-12): موقع مبرد المحفز ودوره في توليد البخار
- 38 الشكل (2-13): مخطط دخول اللقيم إلى عملية التكسير الحفزي المائع
- 39 الشكل (2-14): مخطط سير عملية التكسير الهيدروجيني
- 40 الشكل (2-15): استرجاع الطاقة الهيدروليكية من الخطوط عالية الضغط
- 40 الشكل (2-16): سير عملية المعالجة الهيدروجينية للمقطرات الوسطى
- 41 الشكل (2-17): مقارنة بين مسار الخارج من المفاعل قبل وبعد إضافة فاصل جديد
- 42 الشكل (2-18): مخطط عملية التهذيب الحفزي بطريقة التنشيط المستمر
- 43 الشكل (2-19): مخطط عملية التهذيب الحفزي بالتنشيط المتقطع
- 43 الشكل (2-20): تركيب مكثف إضافي على الخط الخارج من عمود فصل الغازات في وحدة التهذيب الحفزي
- 44 الشكل (2-21): مخطط وحدة التهذيب قبل وبعد إضافة مبادل حراري متطور في مصفاة نورماندي
- 45 الشكل (2-22): عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري
- 45 الشكل (2-23): مخطط توزيع الهيدروجين في مصفاة تكرير النفط
- 46 الشكل (2-24): عملية استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة
- 47 الشكل (2-25): عملية تحويل مخلفات عمليات التكرير إلى هيدروجين ووقود غازي
- 48 الشكل (2-26): الاستفادة من حرارة المدخنة في تسخين هواء الاحتراق
- 48 الشكل (2-27): مبادل حراري أنبوبى
- 49 الشكل (2-28): حزمة أنابيب مبادل حراري قبل وبعد توضع الرواسب
- 50 الشكل (2-29): شبكة الوقود الغازي في المصفاة
- 51 الشكل (2-30): منظومة التحكم بشبكة الوقود الغازي في مصفاة النفط
- 54 الشكل (2-31): مخطط شبكة توليد وتوزيع بخار الماء في مصافي النفط
- 55 الشكل (2-32): العلاقة بين نسبة الهواء إلى الوقود وكفاءة الحرق في مولد بخار الماء
- 56 الشكل (2-33): العزل الحراري لجدار فرن عمليات التكرير
- 56 الشكل (2-34): نموذج عوازل منع دخول الهواء عبر فوهات دخول الأنابيب إلى الفرن
- 57 الشكل (2-35): استرجاع الحرارة من غازات مدخنة المرحل البخاري
- 58 الشكل (2-36): العلاقة بين سماكة الرواسب وكفاءة انتقال الحرارة في المراحل البخارية
- 58 الشكل (2-37): أنابيب الأفران والمراحل البخارية قبل وبعد عملية الغسيل
- 60 الشكل (2-38): مبدأ عمل مصيدة بخار الماء
- 61 الشكل (2-39): إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في شبكة توزيع البخار
- 63 الشكل (2-40): مخطط التكامل بين شبكات الوقود وبخار الماء والكهرباء في مصفاة النفط
- 64 الشكل (2-41): نموذج استخدام وحدة التوليد المشترك

65	الشكل (2-42): مخطط وحدة استرجاع غازات الشعلة في مصفاة تكرير النفط
66	الشكل (2-43): مقارنة بين نوعي جريان تيار الماء والهواء في أبراج مياه التبريد
67	الشكل (2-44): سير العمل في منظومة تخزين وتحضير منتجات المصفاة النهائية
71	الشكل (2-45): نماذج تطبيق التقنيات الرقمية في مصافي تكرير النفط
76	الشكل (2-46): مزايا المبادل الحراري المتطور كومباكبلوك
80	الشكل (2-47): مكونات وفوائد مشروع التحول الرقمي لتحسين كفاءة الطاقة في مصفاة ريبسول
81	الشكل (2-48): مخطط وحدة المعالجة الهيدروجينية لزيت الغاز
85	الشكل (3-1): العناصر الأساسية لمعيار إدارة الطاقة ISO:50001
86	الشكل (3-2): تكامل معيار إدارة الطاقة مع معايير الإدارة الأخرى
87	الشكل (3-3): مراحل تنفيذ نظام إدارة الطاقة
90	الشكل (3-4): نموذج بيان سياسة الطاقة لمصفاة تكرير النفط
92	الشكل (3-5): نموذج البيانات المطلوبة لمشروع تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة تكرير النفط
96	الشكل (3-6): الإطار العام لمؤشرات قياس كفاءة الطاقة في مصفاة تكرير النفط
99	الشكل (3-7): مراحل تطبيق مؤشرات قياس أداء الطاقة في المصفاة
105	الشكل (3-8): هرم قياسات برنامج إدارة الطاقة في منشآت شركة إكسون موبيل
106	الشكل (3-9): مكونات مرحلة تحضير برنامج كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل
107	الشكل (3-10): تصنيف فوائد برنامج تحسين كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل
109	الشكل (3-11): استراتيجية مصفاة سيلاكاب لتحسين كفاءة الطاقة
110	الشكل (3-12): إجمالي توفير الطاقة في وحدة التكسير الحفزي للبواقي الثقيلة
111	الشكل (3-13): فريق العمل المتخصص بتنفيذ المشروع
111	الشكل (3-14): الميزانية الإجمالية لمشروع تطبيق برنامج كفاءة الطاقة ISO 50001
112	الشكل (3-15): عملية مراجعة بيانات الطاقة
113	الشكل (3-16): تحليل نتائج إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة سيلاكاب
115	الشكل (3-17): خارطة طريق تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة سيلاكاب

قائمة الجداول

17	الجدول (1-1): تصنيف مصافي النفط حسب مؤشر كفاءة الطاقة
19	الجدول (1-2): استهلاك الطاقة في عمليات التكرير الرئيسية، ألف وحدة حرارية بريطانية/برميل
23	الجدول (1-3): كمية انبعاثات CO ₂ حسب نوع الوقود
52	الجدول 2-1: نموذج موازنة شبكة الوقود الغازي في المصفاة
59	الجدول 2-2: إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مولدات بخار الماء

قائمة المصطلحات

الرمز	المصطلح العربي	المصطلح الإنجليزي
APC	التحكم المتقدم بالعمليات	Advanced Process Control
	الطاقة التكريرية الفعلية	Capacity Utilization
CHP	التوليد المشترك للحرارة والطاقة	Combined Heat and Power
CCR	التهذيب الحفزي بالتنشيط المستمر	Continuous Catalytic Reforming
DCU	تفديم مؤجل	Delayed Coking
DT	توأم رقمي	Digital Twins
	رقمنة	Digitalization
EE	كفاءة الطاقة	Energy Efficiency
EI	مؤشر كفاءة الطاقة	Energy Efficiency Index
EII	مؤشر كثافة الطاقة	Energy Intensity Index
FCC	تكسير حفزي مائع	Fluidized Catalytic Cracking
ISO	المنظمة الدولية للتقييس	International Standardisation Organisation
	زيوت تزييت	Lube Oil
NCI	مؤشر تعقيد نيلسون	Nelson Complexity Index
OA	جاهزية تشغيلية	Operational Availability
PA	تحليلات تنبؤية	Predictive Analytics
RTO	التحسين بالوقت الفعلي	Real-Time Optimization
RFG	غازات وقود المصفاة	Refinery Fuel Gas

ملخص تنفيذي

ساهمت ظروف المنافسة الحادة في الأسواق العالمية، وتشدّد تشريعات خفض انبعاثات الكربون في دفع القائمين على صناعة التكرير للبحث عن الطرق الممكنة لتحسين كفاءة الطاقة.

تقاس كمية الطاقة المُستهلكة في مصافي النفط بكمية الحرارة اللازمة لتكرير برميل واحد من النفط الخام (وحدة حرارية بريطانية/البرميل). أما كفاءة الطاقة فتقاس بنسبة كمية الحرارة المُستهلكة لتكرير برميل من النفط الخام إلى كمية الحرارة المستهلكة في المصافي المعيارية. كما طورت أدوات أخرى لقياس مستوى كفاءة الطاقة في المصافي منها مؤشر كثافة الطاقة Energy Intensity Index EII ويعبر عن نسبة الاستهلاك الفعلي للطاقة في المصفاة مقارنة بمتوسط الاستهلاك في المصافي النموذجية في العالم، مع الأخذ بعين الاعتبار التباين بين المصافي من حيث درجة التعقيد التكنولوجي، ونوع عمليات التكرير، وحجم الطاقة التكريرية.

العوامل المؤثرة في كفاءة الطاقة في مصافي النفط

يؤثر في كفاءة استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط عوامل عديدة، منها ما هو داخلي، ومنها ما هو خارجي. من العوامل الداخلية نسبة الطاقة التكريرية الفعلية إلى الطاقة التكريرية التصميمية القصوى، وجودة التصميم الهندسي لعمليات التكرير، ومدى تطور التقنيات المتبعة، وجودة أجهزة التحكم بظروف التشغيل. أما العوامل الخارجية فهي نمط الطلب المحلي على المنتجات البترولية، والمواصفات المعيارية المطلوبة، وسهولة الحصول على النفط الخام، وخصائص النفط المكرر، والعوامل الجوية كدرجة حرارة الطقس والرطوبة.

معوقات تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط

إن عدم القدرة على تأمين التمويل اللازم لتنفيذ مشاريع تحسين كفاءة الطاقة يعتبر من أكثر العوامل المؤدية إلى تفاقم مشكلة زيادة استهلاك الطاقة في مصافي النفط، وضعف وعي القائمين على إدارة المصفاة بأهمية تحسين كفاءة الطاقة، والتركيز أكثر على الحفاظ على معدلات الإنتاج، والخوف من المخاطرة المرتبطة باستبدال التقنيات القديمة التي اعتاد عليها المشغلون بتقنيات حديثة غير مألوفة.

دوافع وفوائد تطبيق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط

على الرغم من أن تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة قد يحتاج إلى استثمارات كبيرة، إلا أنها تعتبر من المشاريع المجدية اقتصادياً نظراً لانعكاساتها الإيجابية العديدة، حيث يمكن أن تصل قيمة التوفير في تكاليف استهلاك الطاقة نتيجة تطبيق برنامج تحسين كفاءة الاستهلاك إلى ملايين الدولارات سنوياً، وذلك تبعاً لحجم المصفاة والوضع القائم قبل تطبيق البرنامج. وهناك فوائد أخرى غير مباشرة تفوق الفائدة الاقتصادية الناتجة عن توفير تكاليف الطاقة، وهي تحسين صورة المصفاة أمام الجمهور نتيجة تحسين قدرتها على الالتزام بمتطلبات التشريعات البيئية وخفض الانبعاثات، علاوة على خلق فرص عمل مباشرة وغير مباشرة.

فرص تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط

ترتكز عملية تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط على مجموعة من الاستراتيجيات الأساسية، كتطوير عمليات التكرير بهدف تطبيق تقنيات حديثة تساهم في خفض استهلاك الطاقة، إضافة إلى إجراء مقارنة مرجعية لتحديد مواطن الضعف والبحث عن الحلول المناسبة، إلى جانب تنظيم حملات توعية لتعزيز الوعي بأهمية تحسين كفاءة الطاقة.

تعتبر طريقة المقارنة المرجعية Benchmarking إحدى أدوات إدارة الطاقة في المنشآت الصناعية، حيث تقوم بعض مراكز الأبحاث بإجراء مسح استقصائي لمجموعة متنوعة من المنشآت المتماثلة، باستخدام مؤشرات قياس الأداء التشغيلي والاقتصادي، وتستخدم النتائج لتحديد القيم المثالية لظروف التشغيل واختيار الوسائل المناسبة لتحسين الأداء. فعلى سبيل المثال، تستخدم في مصافي النفط مؤشرات قياس مختلفة كحجم الطاقة التكريرية، ودرجة التعقيد التكنولوجي أو مؤشر تعقيد نيلسون Nelson Complexity Index، ونوع النفط الخام المكرر، وذلك بهدف تحديد القيم المرجعية لمعدلات استهلاك الطاقة في كل جزء من أجزاء المصفاة للاستفادة منها في تقييم الأداء مقارنة بالمصافي الأخرى المماثلة، وتحديد العوامل المساعدة على خفض استهلاك الطاقة، وصياغة الأهداف، واختيار المشاريع الأنسب لخفض استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها. (IPIECA, 2023)

لا توجد طريقة واحدة، أو تقنية معينة يمكن الاعتماد عليها لتعظيم كفاءة الطاقة، إنما لكل منشأة خصوصيتها التي تفرض حلولاً قد تختلف كلياً أو جزئياً عن الحلول المطبقة في منشأة أخرى مشابهة لها في طبيعة الأعمال. (Rossiter, P., Jones, P., 2015)

تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة

تصنف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة حسب حجم التكاليف إلى إجراءات منخفضة التكاليف وإجراءات متوسطة وأخرى مرتفعة. أو حسب نظام الاستخدام الذي يعتمد على مبدأ عمل أنظمة الطاقة الحرارية، والغلايات، والأفران، والمبادلات الحرارية، ويوجد تصنيف حسب التأثير على أداء الطاقة، أو حسب الهدف الاستراتيجي. وبما أن لكل مصفاة خصائصها المختلفة، فإنه لا بد من اختيار فرص تحسين كفاءة الطاقة على أساس الواقع الفعلي، ودراسة الظروف المحيطة بالمصفاة بدقة. (Lizot, M., et al., 2023)

تحسين كفاءة عمليات تكرير النفط.

تعتبر عملية تقطير النفط الخام من أكبر مراكز استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط، حيث تمثل نحو 22% من إجمالي الطاقة المستهلكة في المصفاة، وأهم فرص تحسين كفاءة الطاقة في هذه العملية هي تحسين أداء فاصل الأملاح، وتنظيم ظروف التشغيل، وتحسين التكامل الحراري بهدف الاستفادة من الحرارة الكامنة في المنتجات المراد تبريدها في تسخين المواد المطلوب تسخينها وبالتالي تخفيض كمية الوقود المستهلك في الأفران. (Zein., S., et al., 2026)

تلعب أجهزة التحكم دوراً مهماً في ضبط ظروف التشغيل عند القيم التي تضمن استهلاك الطاقة ضمن الحدود الدنيا، إضافة إلى تركيب صواني متطورة في عمود فصل المنتجات تتميز بكفاءة فصل عالية، وتحسين العزل الحراري لجدران الفرن، وتركيب مسخن أولي لهواء الاحتراق الداخل إلى الفرن، وتعديل نظام

التحكم بهواء الاحتراق لضبط نسبة الأكسجين بالقيمة التي تضمن كفاءة حرق الوقود، واسترجاع الهيدروجين من غازات المصفاة الفائضة، والعمل على معالجة مشكلة الانسداد Fouling التي تؤدي إلى تخفيض كفاءة انتقال الطاقة في المبادلات الحرارية، كما تساهم إجراءات الفحص الدوري لخطوط المضخات والضواغط في الكشف عن احتمالات وجود تجمع للرواسب أو انسداد يؤدي إلى إعاقة مرور السائل، وبالتالي ارتفاع استهلاك الطاقة.

من جهة أخرى، أحدثت التطورات التكنولوجية ثورة في مجال تحسين كفاءة الطاقة، مثل إنترنت الأشياء IoT والذكاء الاصطناعي AI وتحليلات البيانات المتقدمة وتمكين مصافي التكرير من اكتساب رؤية شاملة حول أنماط استهلاك الطاقة، وتحديد أوجه القصور، واتخاذ قرارات تعزز كفاءة الطاقة.

نظام إدارة الطاقة في صناعة تكرير النفط

يمثل نظام إدارة الطاقة القاعدة الأساسية التي تنطلق منها برامج تحسين كفاءة الطاقة، وذلك من خلال دوره في تحديد أماكن وفرض خفض استهلاك الطاقة، وبالتالي خفض تكاليف التشغيل التي تعتبر من أكثر العوامل المساعدة على تحسين القدرة التنافسية للشركات والمنشآت الصناعية.

أصدرت المنظمة الدولية للتقييس ISO في عام 2011 معياراً خاصاً لإدارة الطاقة ISO:50001:2011. وهو نسخة معدلة وبديلة عن معيار إدارة الطاقة الأوروبي EN 16001:2010، وذلك لمساعدة المنشآت الصناعية على مواجهة التعقيدات، وتسهيل تنفيذ إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها بأقل التكاليف الممكنة، علاوة على تنظيم إجراءات التحسين وجعلها جزءاً من الأعمال الاعتيادية في المنشأة. (Almanza, F., & Santos, G., 2025)

تكامل معيار إدارة الطاقة مع نظم الإدارة الأخرى

صمم معيار إدارة الطاقة ISO:50001 بهيكلية تسهل التكامل مع معايير الإدارة الأخرى، كمعيار نظام إدارة الجودة ISO:9001، ومعيار نظام الإدارة البيئية ISO:14001، حيث أن كافة هذه المعايير تعتمد على مبدأ التخطيط، والتنفيذ، والاختبار، والمراقبة، ثم التحسين المستمر. كما تشير البيانات الإحصائية إلى أن معظم المنشآت الصناعية التي حصلت على شهادة تطبيق إدارة الطاقة ISO:50001 كانت قد التزمت بمتطلبات معيار الإدارة البيئية ISO:14001 (Marimo, F., & Casadesus, M., 2017)

مراحل تطبيق نظام إدارة الطاقة

ينطلق مشروع تطبيق نظام إدارة الطاقة باتخاذ كافة الإجراءات التي يمكن من خلالها بلورة التزام العاملين في المصفاة بعملية التحسين المستمر، ثم تتبعها عملية إعداد خطة استراتيجية تتكون من عدة خطوات تبدأ بتقييم مستوى الأداء الراهن وتحديد فرص تحسين كفاءة استهلاك الطاقة، والتي تعتبر المنصة التي تنطلق منها مرحلة إعداد وتنفيذ خطة العمل، ثم تأتي مرحلة التقييم المستمر لعملية التنفيذ، وذلك لمتابعة تقييم نتائج تقدم الأداء مقارنة بالقيم التي كانت عليه قبل بدء التنفيذ، والكشف عن مواطن الضعف ونقاط الانحراف عن الخطة المرسومة وتحليل أسبابها، وإعداد الحلول المناسبة لتجنب تكرارها.

لمؤشرات قياس كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط أهمية كبيرة في نجاح تطبيق نظام إدارة الطاقة، والارتقاء بأداء المصفاة إلى المستويات المعيارية، وأهم هذه الأهداف:

- قياس كفاءة استخدام الطاقة في وحدات المصفاة بشكل دوري.
- كشف الانحرافات التشغيلية مبكراً.
- دعم اتخاذ القرار لتحسين الأداء وخفض الفاقد.
- ربط مؤشرات الطاقة بالأداء التشغيلي والإنتاجي والاقتصادي.
- توفير أساس عملي لتطبيق نظام إدارة الطاقة داخل المصفاة.

عوامل نجاح تنفيذ معيار إدارة الطاقة

يعتمد نجاح تطبيق معيار إدارة الطاقة على دعم الإدارة العليا، ومدى اهتمام العاملين بأهمية مشروع تحسين كفاءة الطاقة، وحجم المكاسب التي يمكن الحصول عليها. كما يتطلب نجاح تنفيذ معيار إدارة الطاقة تضافر عدة عوامل تتدرج من إيجاد تشريعات ونظم إدارية تساعد على تعظيم القيمة، وتوفير خبرة سابقة في تطبيق نظم الإدارة، وإعداد هيكل إداري منظم، وإعداد خطط للتحسين المستمر، والعمل على تقييم أداء الوحدات بشكل دائم ودوري، واقتراح استبدال الأجهزة ذات الأداء الضعيف بأخرى متطورة ذات ميزات أعلى من حيث الدقة والكفاءة، والاهتمام بتدريب العاملين، لرفع قدرتهم على تنفيذ إجراءات تحسين كفاءة الطاقة بدون أخطاء. (Shah, R., & Akhtar, R. 2024)

فوائد تطبيق معيار إدارة الطاقة

من أهم فوائد تطبيق نظام إدارة الطاقة في صناعة تكرير النفط أنه يساهم في تعزيز فرص التكامل بين المصافي المتقاربة جغرافياً، علاوة على التكامل بين الوحدات الإنتاجية ضمن المصفاة الواحدة، وذلك من خلال تأمين رؤية شاملة لكافة خطوط الطاقة في المصفاة، بدلاً من الطريقة التقليدية التي تعتمد على التركيز على الخطوط الموجودة في كل وحدة من الوحدات، أو ضمن مجموعة من الخطوط التي ترتبط فيما بينها بخصائص مشتركة، كخطوط بخار الماء والوقود وشبكات الطاقة الكهربائية.

الفصل الأول

أهمية ترشيد استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط

شهدت العقود الثلاثة الماضية ارتفاعاً ملحوظاً في استهلاك الطاقة في العالم، مدفوعاً بازدهار الاقتصاد العالمي، وتحسين ظروف المعيشة. ويمثل النفط والغاز النسبة العظمى من مزيج الطاقة المستخدمة، ويتوقع أن يبقى الوقود الأحفوري مستحوذاً على النسبة الأعلى لعقود قادمة، مما يؤكد على ضرورة اتخاذ الإجراءات اللازمة لتحسين كفاءة استخدام الطاقة.

من جهة أخرى، ساهمت ظروف المنافسة الحادة في الأسواق العالمية، وتشدد تشريعات خفض انبعاثات الكربون من المنشآت الصناعية في دفع القائمين على صناعة التكرير للبحث عن الطرق الممكنة لترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها.

تصنف صناعة تكرير النفط بأنها من الصناعات الكثيفة الاستهلاك للطاقة، حيث تمثل تكلفة الطاقة حوالي 30% من التكاليف المتغيرة وتكاليف العمالة، وهي ثاني أكبر بند إنفاق بعد تكلفة المواد الخام، كما تشكل نسبة استهلاك الوقود وبخار الماء والكهرباء نحو 3-4% من كمية النفط المكرر في مصافي النفط البسيطة، وقد ترتفع إلى 7-8% في المصافي العالية التعقيد التكنولوجي. (LAU, C., 2022)

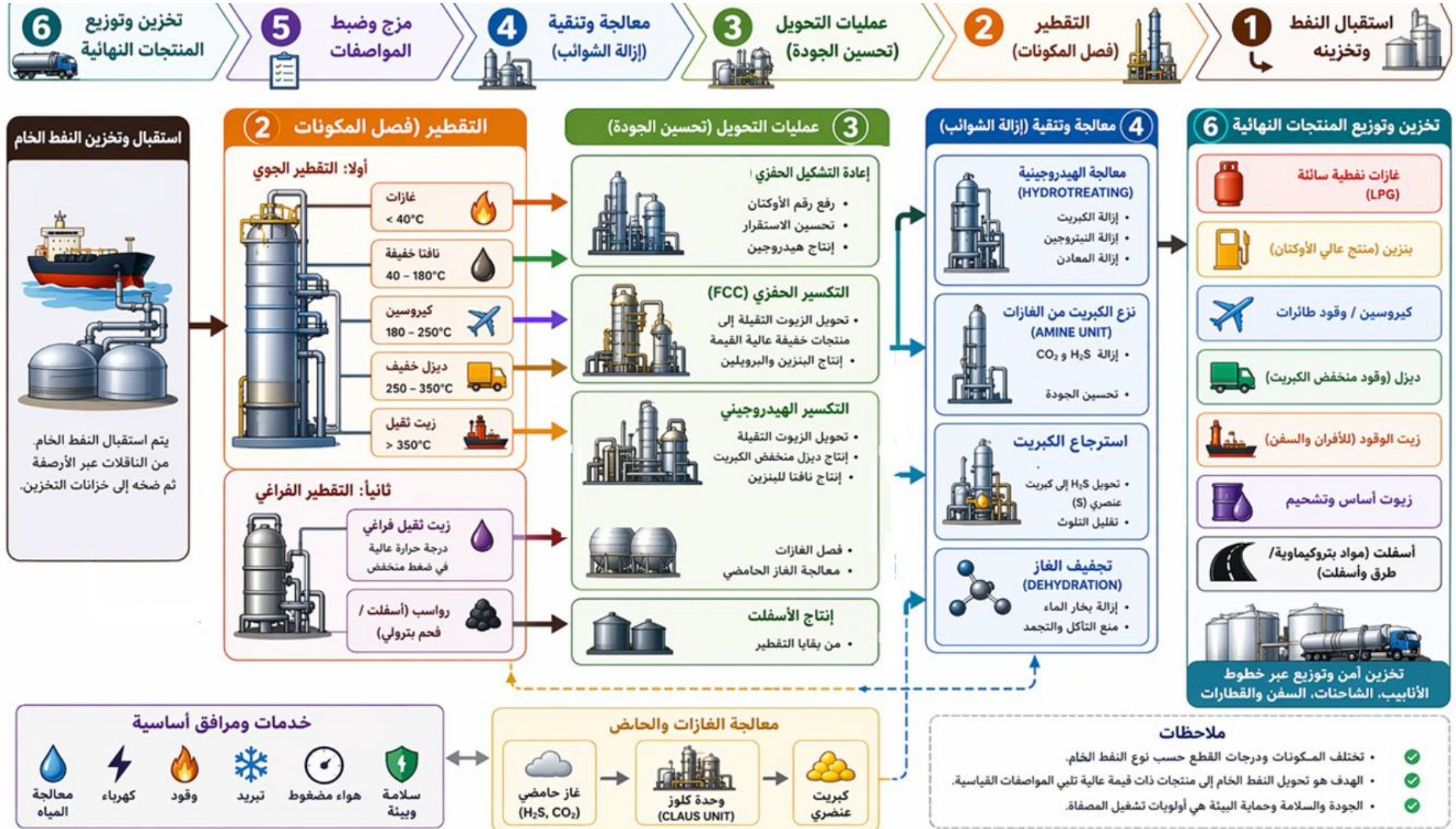
يحتوي هذا الفصل على شرح موجز للمكونات الرئيسية لمصفاة تكرير النفط، مع الإشارة إلى أهم مواقع استهلاك الطاقة وطرق قياسها. كما يتضمن أهم دوافع تحسين كفاءة الطاقة في المصافي، والفوائد التي يمكن الحصول عليها نتيجة تطبيق برامج ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها.

1-1: المكونات الرئيسية لمصفاة تكرير النفط

يتركز نشاط مصافي تكرير النفط في تحويل النفط الخام إلى مشتقات بترولية متنوعة قابلة للاستهلاك، كغاز البترول المسال LPG، والغازولين، والكيروسين، والديزل، وزيت الوقود، وزيوت التزيت، والأسفلت، والفحم، ومنتجات أخرى.

تتكون عمليات مصفاة تكرير النفط من أربعة أنواع رئيسية، هي عمليات التقطير الجوي والفراغي، والعمليات التحويلية، وعمليات المعالجة، والعمليات المساندة. ويختلف نوع وحجم عمليات التكرير من مصفاة لأخرى، تبعاً لنوع النفط الخام المكرر، وخصائص المنتجات النهائية المطلوبة. **الشكل 1-1** مخطط سير العمليات في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (1-1): مخطط سير العمليات في مصفاة تكرير النفط



المصدر: أوابك 2025

1-2: مصادر الطاقة المستهلكة في مصافي تكرير النفط

تحصل المصفاة على الطاقة كوقود غازي مكون من الغازات الفائضة عن عمليات التكرير Refinery Gases، والباقي على شكل وقود سائل، أو صلب كالفحم البترولي، أو غاز طبيعي، أو طاقة كهربائية. ويتوقف اختيار النوع الأنسب حسب توفره، أو نوع عمليات التكرير في المصفاة.

تنتج بعض عمليات التكرير في المصفاة مواد ثانوية يمكن استخدامها لتوليد الطاقة، كعملية التكسير الحفزي المائع FCC التي تحول المنتجات الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية القيمة، حيث يستفاد من حرق الفحم المترسب على سطح المحفز Catalyst في توليد بخار الماء اللازم لعمليات التسخين في المصفاة.

نظراً لحاجة مصافي النفط إلى كميات كبيرة من الطاقة على شكل بخار ماء وكهرباء، تلجأ المصافي إلى إنشاء وحدات توليد مشترك يتم فيها توليد بخار الماء بضغط مرتفع، ثم يستفاد من تخفيض الضغط في توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل وحدات المصفاة، بينما يصدر الفائض إلى الشبكة العامة.

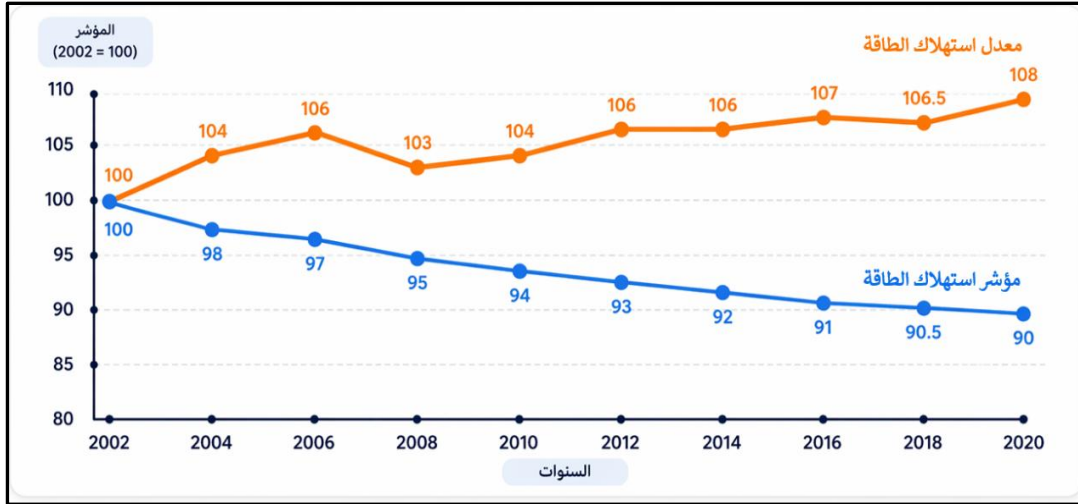
1-3: قياس كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط

تقاس كمية الطاقة المستهلكة في مصافي النفط بكمية الحرارة اللازمة لتكرير برميل واحد من النفط الخام (وحدة حرارية بريطانية/البرميل). أما كفاءة الطاقة فتقاس بنسبة كمية الحرارة المستهلكة لتكرير برميل من النفط الخام إلى كمية الحرارة المستهلكة في المصافي المعيارية. ويختلف مصطلح تحسين كفاءة الطاقة عن تعبير ترشيد استهلاك الطاقة، على الرغم من أن لهما دور واحد وهو خفض كمية الطاقة المستهلكة، حيث يستخدم مصطلح كفاءة الطاقة لخفض كثافة استهلاك الطاقة في عملية أو نشاط محدد، للحصول على نفس المنتج أو الخدمة، وذلك من خلال استخدام تقنيات، أو عمليات، أو معدات ذات كفاءة أعلى. أما مصطلح ترشيد الطاقة فيتعلق أكثر بالسلوك البشري وطريقة تنفيذ العمليات، أي خفض استهلاك الطاقة من خلال خفض الاستخدام، كتوقيف بعض المعدات غير الضرورية، أو إلغاء بعض الأنشطة غير المهمة. يستخدم مقياس كفاءة الطاقة Energy Efficiency كأحد أهم مؤشرات قياس الأداء التشغيلي للمصافي.

كما طورت أدوات أخرى لقياس مستوى كفاءة استخدام الطاقة في المصافي منها مؤشر كثافة الطاقة Energy Intensity Index EII وهو مقياس ابتكرته رابطة سولومون Solomon Associates المتخصصة بدراسات الطاقة (Solomon, 2016). يعبر مؤشر كثافة الطاقة عن نسبة الاستهلاك الفعلي للطاقة في المصفاة مقارنة بمتوسط الاستهلاك في المصافي النموذجية في العالم، مع الأخذ بعين الاعتبار التباين بين المصافي من حيث درجة التعقيد التكنولوجي، ونوع عمليات التكرير، وحجم الطاقة التكريرية، حيث أن قياس معدل استهلاك الطاقة لكل برميل مكرر لا يعطي صورة واضحة عن أداء المصفاة ما لم تراعى الظروف المؤثرة في الاستهلاك.

فعلى سبيل المثال، ارتفع معدل استهلاك الطاقة لكل طن من النفط المكرر في مصافي أوروبا الغربية خلال الفترة من 2002 إلى 2020، إلا أن مؤشر كثافة الطاقة انخفض من 100 إلى 90 في عام 2020 مقارنة بمستوى عام 2002، مما يشير إلى تحسن في كفاءة استخدام الطاقة على الرغم من ارتفاع معدل الاستهلاك. يبين الشكل 1-2 تطور استهلاك الطاقة ومؤشر كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية.

الشكل (1-2): تطور استهلاك الطاقة ومؤشر كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية



المصدر: CONCAWE, 2022

كما يحدد أداء المصفاة بقياس "مؤشر كفاءة الطاقة" مع مراعاة الاختلاف في نوع عمليات التكرير، وحجم الطاقة التكريرية، وجودة النفط الخام، وكفاءة مولدات الطاقة الكهربائية وبخار الماء. عندما تكون قيمة المؤشر 100 فهذا يعني أنها مصفاة مثالية، ولا تتحقق هذه القيمة إلا في المصافي الجديدة المتطورة، فإذا كانت قيمة المؤشر 180 فهذا يعني أن المصفاة تستهلك طاقة بمعدل 80% أعلى من القيمة المثالية. وبناء على ذلك تم تصنيف مصافي العالم حسب قيمة مؤشر كفاءة الطاقة. **يبين الجدول 1-1 تصنيف مصافي النفط حسب مؤشر كفاءة الطاقة**

الجدول (1-1): تصنيف مصافي النفط حسب مؤشر كفاءة الطاقة

مؤشر كفاءة الطاقة %	التقييم	ملاحظات
100	مثالي	لا يمكن أن تصل المصافي القائمة إلى هذه النسبة
149-130	ممتاز	القليل من مصافي العالم تحقق هذه القيمة
179-150	جيد	إدارة جيدة للطاقة
199-180	متوسط	نظام إدارة الطاقة بحاجة إلى انتباه
250-200	ضعيف	تطبيق نظام إدارة الطاقة ضعيف
أعلى من 250	الأضعف	المصفاة كثيفة استهلاك الطاقة

المصدر: SOLOMON, 2022

يطبق مؤشر كفاءة الطاقة للعملية Process Energy Efficiency Index على إحدى عمليات التكرير ضمن المصفاة، ويحسب بنسبة فرق الحمولة الحرارية بين الوحدة العملية والوحدة المرجعية، مقسوماً على حمولة الوحدة التشغيلية. كما يُراعى هذا المؤشر أيضاً الفاقد الحراري للوحدة إلى البيئة. قامت شركة سولومون بإعداد دراسة استقصائية شملت أكثر من 280 مصفاة، تمثل نحو 85% من طاقة التكرير العالمية، وقد تضمنت الدراسة بيانات أعوام 2016 و 2018 و 2020 تتعلق بأربعة مؤشرات وهي: الجاهزية التشغيلية OA، ومؤشر كثافة الطاقة EII، ومؤشر كفاءة تكلفة الصيانة MEI، والعائد على الاستثمار ROI. خلصت الدراسة إلى أن أفضل مصافي التكرير في العالم تتميز بأنها أكثر كفاءة في استخدام الطاقة بنسبة 20%، وأقل تكلفة صيانة بنسبة 40%، وأكثر موثوقية بنسبة 30%، ولديها

معدل استخدام أعلى بنسبة 6%، وأكثر ربحية بنسبة 60%، وذلك مقارنة بالمعدلات الوسطية لقيم مؤشرات القياس. (SOLOMON, 2022)

1-4: العوامل المؤثرة في كفاءة الطاقة في مصافي النفط

يؤثر في كفاءة استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط عوامل عديدة، منها ما هو داخلي، ومنها ما هو خارجي. من العوامل الداخلية نسبة الطاقة التكريرية الفعلية إلى الطاقة التكريرية التصميمية القصوى، وجودة التصميم الهندسي لعمليات التكرير، ومدى تطور التقنيات المتبعة، وجودة أجهزة التحكم بظروف التشغيل. أما العوامل الخارجية فهي نمط الطلب المحلي على المنتجات البترولية، وخصائص النفط الخام المكرر، والعوامل الجوية كدرجة حرارة الطقس والرطوبة. وفيما يلي أهم العوامل المؤثرة في كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط.

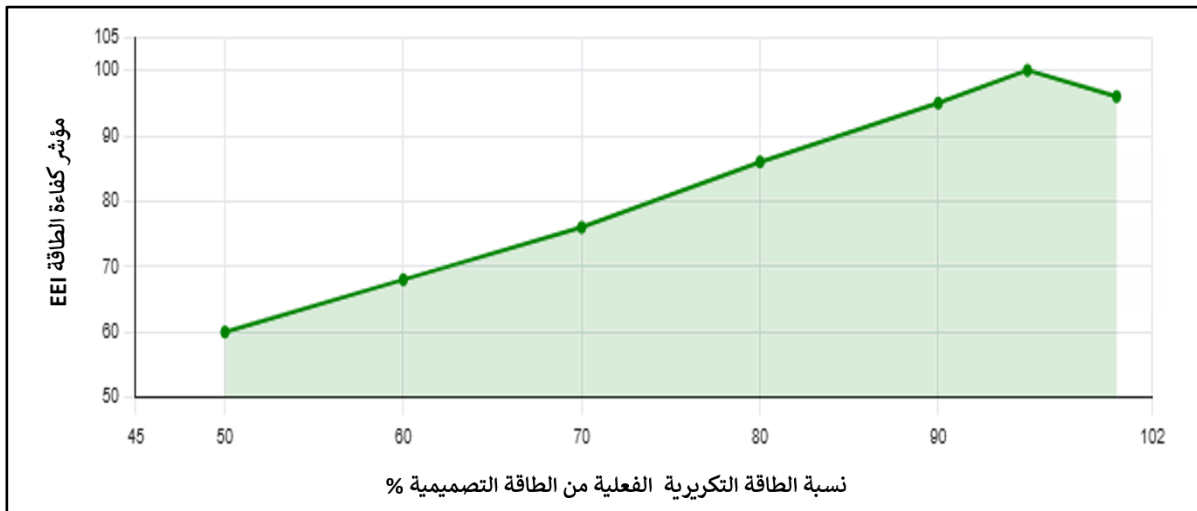
1-4-1: سهولة الحصول على مصادر الطاقة

يساهم توفر مصدر آمن للطاقة قريب من موقع المصفاة وبأسعار مقبولة في خفض تكاليف استهلاك الطاقة في المصافي. فعلى سبيل المثال، عندما لا تتوفر إمكانية الحصول على الغاز الطبيعي من مصدر قريب فإن المصفاة تضطر إلى استخدام بدائل أخرى كزيت الوقود أو الفحم أو النافثا، وهي منتجات مرتفعة التكلفة مقارنة بالغاز الطبيعي، وخصوصاً إذا ما أخذ بعين الاعتبار تكاليف معالجة الانبعاثات الناتجة عن استخدام الوقود لتلبية متطلبات التشريعات البيئية.

1-4-2: الطاقة التكريرية الفعلية للمصفاة

تتحسن كفاءة الطاقة مع زيادة معدل استخدام الطاقة التكريرية المصفاة، نظراً لتوزيع فاقد الطاقة الثابت على إنتاجية أعلى. ويتراوح نطاق التشغيل الأمثل عادةً بين 80% و95% من معدل الاستخدام، حيث تعمل المعدات بالقرب من ظروف التشغيل التصميمية، ويتم تقليل استهلاك الطاقة إلى أدنى حد. خارج النطاق الأمثل، قد تستقر الكفاءة أو تنخفض قليلاً بسبب الاختناقات، والقيود التشغيلية، وزيادة أحمال إعادة التدوير، ومحدودية المعدات. يبين الشكل 1-3 العلاقة بين الطاقة التكريرية الفعلية ومؤشر كفاءة الطاقة في المصفاة.

الشكل (1-3): العلاقة بين الطاقة التكريرية الفعلية وكفاءة استهلاك الطاقة في المصفاة



المصدر: Wood, 2023

1-4-3: نمط الطلب على المنتجات البترولية

عند تغير نمط الطلب على المنتجات البترولية نحو استهلاك الأنواع الخفيفة كالفازولين والمقطرات الوسطى على حساب المنتجات الثقيلة كزيت الوقود تحتاج المصافي إلى رفع طاقة عمليات تحويل مخلفات التقطير الثقيلة إلى منتجات خفيفة، وهي وحدات تستهلك كميات كبيرة من الطاقة مقارنة بالعمليات الأخرى كالتقطير والمعالجة الهيدروجينية.

1-4-4: نوع عمليات التكرير

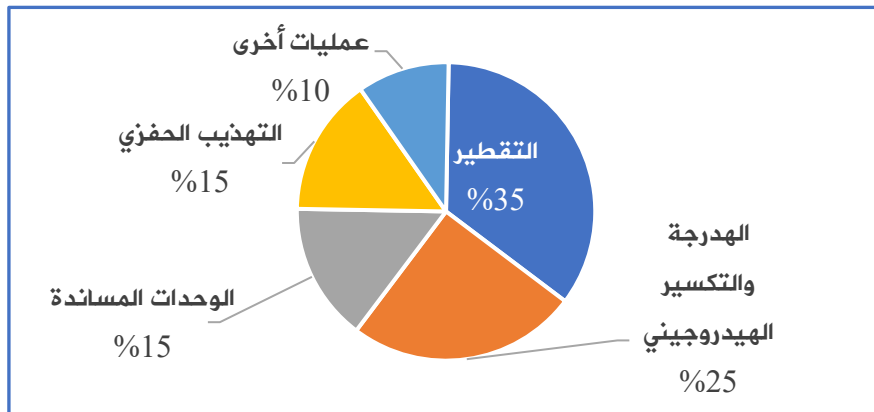
يختلف معدل استهلاك الطاقة في المصفاة تبعاً لنوع عمليات التكرير، فإذا كانت المصفاة تعتمد على عمليات التكسير الحفزي المائع FCC فإن استهلاك الطاقة يكون أعلى من المصفاة التي تعتمد على عمليات التفحيم المؤجل. كما أن عملية التهذيب الحفزي بطريقة التنشيط المستمر CCR تستهلك طاقة أقل من عملية التهذيب الحفزي بطريقة التنشيط المتقطع. كما أن وجود عدة وحدات صغيرة متفرقة لها نفس الغرض يؤدي إلى ارتفاع معدل استهلاك الطاقة مقارنة مع حالة وجود وحدة ذات طاقة إنتاجية عالية تحقق الغاية المرجوة بتكاليف أقل. يبين الجدول 1-2 معدل استهلاك الطاقة في عمليات التكرير الرئيسية. كما يبين الشكل 1-4 الاستهلاك النسبي في عمليات التكرير الرئيسية في مصفاة تكرير النفط

الجدول (1-2): استهلاك الطاقة في عمليات التكرير الرئيسية، ألف وحدة حرارية بريطانية/برميل

العملية	وقود	بخار ماء	كهرباء	الإجمالي
تقطير جوي	80	10	6	96
تقطير فراغي	75	22	3	100
فصل الغازات	0	62	1.8	63.8
تكسير حراري	700	162	15	877
تفحيم مؤجل	80	45	70	195
تكسير حفزي مائع*	51/0	177-/35	57/50	69-/85
تكسير هيدروجيني	200	13	100	313
تهذيب حفزي بالتنشيط المستمر	280	0	50	330
تهذيب حفزي بالتنشيط المتقطع	355	0	75	430
معالجة هيدروجينية	39	34	14	87
أزمة	32	23	12	67

* الرقم الأول عملية قديمة، والرقم اليساري عملية متطورة، المصدر: (SOLOMON, 2022)

الشكل (1-4): الاستهلاك النسبي في عمليات التكرير الرئيسية في مصفاة تكرير النفط



1-4-5: تطور تقنيات التكرير المستخدمة

إن استخدام التقنيات المتطورة لعمليات التكرير والتحكم والصيانة يمكن أن يساهم في خفض كمية الطاقة المستهلكة في المصفاة، حيث أن أنشطة البحث والتطوير قد نجحت في ابتكار تقنيات حديثة ذات فعالية أعلى وتستهلك طاقة أقل. فعلى سبيل المثال، تستهلك عملية التكسير الحفزي المائع القديمة حوالي 85 ألف وحدة حرارية بريطانية لكل برميل من اللقيم الداخل إلى الوحدة، بينما تنتج التقنية المتطورة كمية من الحرارة قدرها 69 ألف وحدة حرارية بريطانية لكل برميل من اللقيم، وذلك نتيجة تطوير تقنية الاستفادة من الحرارة الناتجة من حرق الكربون في عملية تنشيط المحفز في توليد بخار ماء الذي يستخدم في المصفاة.

كما شهدت الرقمنة خلال الأعوام الأخيرة تحولاً من وظيفة لجمع البيانات إلى بنية تشغيلية متكاملة يمكن أن تساهم في تحسين الأداء التشغيلي، وترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها، وذلك من خلال تقنيات التحكم المتقدم بالعمليات Advanced Process Control، والتحسين في الوقت الفعلي Real-Time Optimization، والتوائم الرقمي Digital Twins، والتحليلات التنبؤية Predictive Analytics. وتظهر النتائج العملية أن أثر الرقمنة يتجسد عبر أربع قنوات رئيسية، هي:

- تقليل التوقفات الناتجة عن الأعطال الطارئة.
- تحسين أداء المرافق ووحدات إنتاج بخار الماء والهيدروجين.
- خفض الفواقد الحرارية من خلال تطبيق الصيانة التنبؤية التي توفرها التحليلات التنبؤية.
- تسريع اتخاذ القرارات التشغيلية على مستوى المصفاة أو المؤسسة عبر مراكز القيادة الرقمية.

1-4-6: مواصفات المنتجات

عندما تفرض التشريعات البيئية في البلد التي تعمل فيها المصفاة متطلبات صارمة كخفض محتوى الكبريت في المنتجات البترولية فعندئذ تحتاج المصفاة إلى إضافة عمليات معالجة هيدروجينية للوصول إلى القيمة المطلوبة، وهذه الوحدات تستهلك طاقة إضافية ترفع من استهلاك الطاقة في المصفاة.

1-4-7: نوع النفط الخام المكرر

تؤثر جودة النفط الخام تأثيراً مباشراً وغالباً ما يكون مهيمناً على استهلاك الطاقة في المصافي. إذ تؤدي الكثافة النوعية المنخفضة (حسب مقياس معهد البترول الأمريكي)، والمحتوى العالي من الكبريت، وزيادة نسبة المخلفات إلى ارتفاع متطلبات عمليات التقطير، والمعالجة بالهيدروجين، والتكسير الهيدروجيني، والتفحيم، وإنتاج الهيدروجين. وبناءً على ذلك، تتسم المصافي التي تعالج الخام الثقيل الحامض عادةً بكثافة طاقة أعلى، واستهلاك أكبر للهيدروجين، وانبعاثات أعلى لثاني أكسيد الكربون مقارنة بالمصافي التي تعالج الخام الخفيف الحلو. (EIA, 2024)

1-5: معوقات تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط

على الرغم من أهمية كفاءة الطاقة إلا أن هناك بعض العوامل التي تعيق تطبيق برامج تحسين الأداء يرتبط معظمها بسلوك العاملين في المصفاة، لذلك يجب الاهتمام بتدريب العاملين ودمجهم في دورات تدريبية مكثفة لكي تصبح إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في جدول أعمالهم اليومية.

إن عدم القدرة على تأمين التمويل اللازم لتنفيذ مشاريع تحسين كفاءة الطاقة يعتبر من أكثر العوامل المؤدية إلى تفاقم مشكلة زيادة استهلاك الطاقة في مصافي النفط، فضلاً عن ضعف الخبرة في أسس طلب الدعم المالي من المؤسسات المالية المحلية أو الخارجية لتمويل المشروع.

تعود معظم أسباب انخفاض كفاءة الطاقة في المصافي إلى مجموعة من العوامل المؤسسية والتقنية والإدارية. يبين الشكل 1-5 أبرز عوامل انخفاض كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط

1-5-1: عوامل إدارية وتنظيمية

- ضعف وعي القائمين على إدارة المصفاة بأهمية تحسين كفاءة الطاقة
- تركّز أولويات الإدارة على الحفاظ على معدلات الإنتاج، على حساب تحسين كفاءة الطاقة.
- الخوف من المخاطرة المرتبطة باستبدال التقنيات القديمة التي اعتاد عليها المشغلون بتقنيات حديثة غير مألوفة.

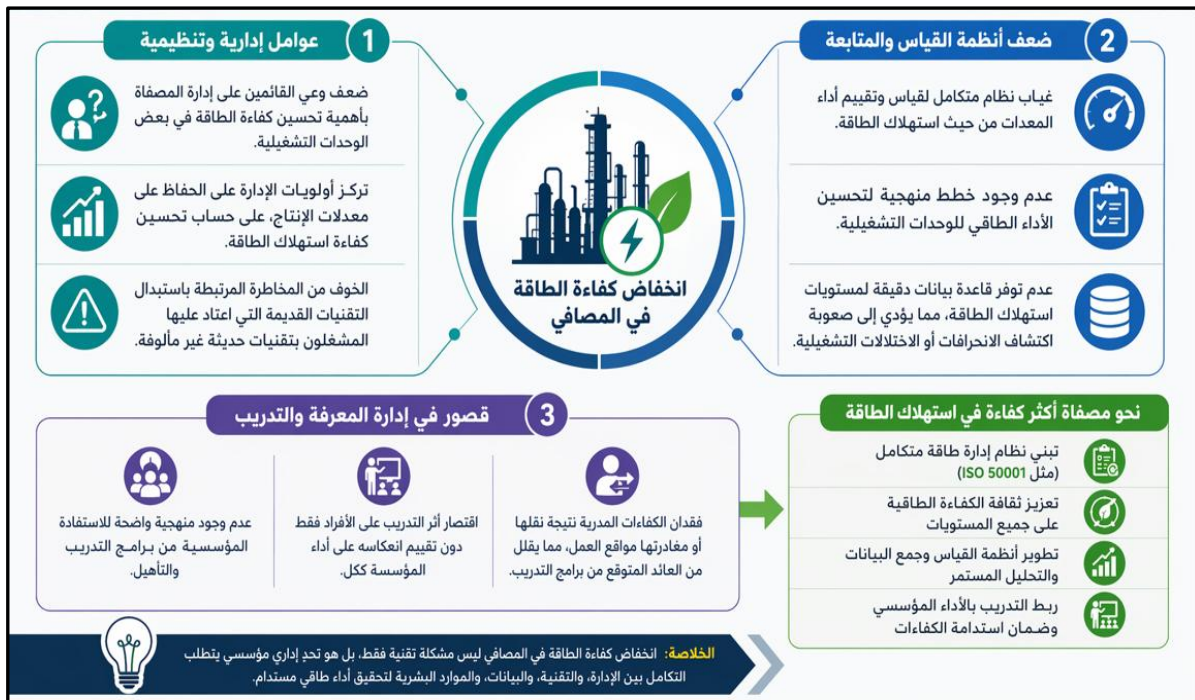
2-5-1: ضعف أنظمة القياس والمتابعة

- غياب نظام متكامل لقياس وتقييم أداء المعدات من حيث استهلاك الطاقة.
- عدم وجود خطط منهجية لتحسين الأداء الطاقوي للوحدات التشغيلية.
- عدم توفر قاعدة بيانات دقيقة لمستويات استهلاك الطاقة،

3-5-1: قصور في إدارة المعرفة والتدريب

- عدم وجود منهجية واضحة للاستفادة المؤسسية من برامج التدريب والتأهيل.
- اقتصار أثر التدريب على الأفراد فقط دون تقييم انعكاسه على أداء المؤسسة ككل.
- فقدان الكفاءات المدربة نتيجة نقلها أو مغادرتها مواقع العمل.

الشكل (1-5): أبرز عوامل انخفاض كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط



1-6: دوافع وفوائد تطبيق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط

على الرغم من أن تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة قد يحتاج إلى استثمارات كبيرة، إلا أنها تعتبر من المشاريع المجدية اقتصادياً نظراً لانعكاساتها الإيجابية العديدة، حيث يمكن أن تصل قيمة التوفير في تكاليف استهلاك الطاقة نتيجة تطبيق برنامج تحسين كفاءة الاستهلاك إلى ملايين الدولارات سنوياً، وذلك تبعاً لحجم المصفاة والوضع القائم قبل تطبيق البرنامج. وهناك فوائد أخرى غير مباشرة تفوق الفائدة الاقتصادية الناتجة عن توفير تكاليف الطاقة، وهي تخفيض كمية الانبعاثات الملوثة للبيئة التي تطلقها المصفاة، وبالتالي تحسين قدرة المصفاة على الالتزام بمتطلبات التشريعات البيئية. وفيما يلي أهم الفوائد التي يمكن الحصول عليها من تطبيق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط.

1-6-1: تحسين هامش الربحية

تشير الدراسات إلى أنه يمكن أن يؤدي تطبيق تدابير تحسين كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 30%. كما أكد برنامج الأمم المتحدة للبيئة UNEP أن تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في صناعة النفط والغاز يمكن أن توفر ما يصل إلى 300 مليار دولار سنوياً بحلول عام 2030. (Zand, M., & Zakizadeh, M., 2024)

مع الأخذ بعين الاعتبار معدل الاستهلاك الكبير للطاقة في صناعة تكرير النفط، يمكن إدراك أهمية إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في تحسين هامش الربحية، وبالتالي فإن أي تخفيض في معدل الاستهلاك يساهم بشكل كبير في تحسين الربحية. ولتحديد أثر تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة على هامش ربحية مصافي النفط تم حساب هامش ربحية مصفاة طاقتها التكريرية 100 ألف برميل/اليوم قبل وبعد تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة، وذلك اعتماداً على المعادلة التالية:

هامش الربحية = قيمة المنتجات - تكاليف المواد الخام - التكاليف المتغيرة - التكاليف الثابتة

تتكون التكاليف الثابتة من الوقود والمحفزات والكيماويات وتكاليف الصيانة، وبالتالي فإن أي خفض في استهلاك الوقود ينتج عنه زيادة في هامش الربحية. فعلى سبيل المثال، قدرت تكاليف استهلاك الطاقة في إحدى المصافي بحوالي 8% من قيمة النفط الخام المكرر ثم انخفضت النسبة إلى 5% بعد تنفيذ مشروع التحسين، أي أن كلفة الوقود انخفضت من 40 مليون دولار في السنة إلى 25 مليون دولار في السنة، وبالتالي فإن إجمالي هامش الربحية قد ارتفع بمقدار 15 مليون دولار في السنة.

1-6-2: تلبية متطلبات التشريعات البيئية

تواجه مصافي النفط ضغوطاً متزايدة مع تطور متطلبات المعايير البيئية الخاصة بمواصفات المنتجات البترولية، كتخفيض نسبة الكبريت، ورفع الرقم الأوكتاني للغازولين. ولكي تتمكن المصافي من تلبية هذه المعايير تحتاج إلى إنشاء عمليات إضافية كوحدات التهذيب الحفزي لرفع الرقم الأوكتاني، وعمليات المعالجة الهيدروجينية لتخفيض محتوى الكبريت. وهذه الوحدات الجديدة، والوحدات المساندة لها، تستهلك كميات أعلى من الطاقة مقارنة بما كانت عليه قبل التشريعات البيئية. (IPIECA, 2023)

كما تطرح مصافي النفط أنواعاً مختلفة من الانبعاثات، وبمعدلات تختلف تبعاً لنوع الوقود المستخدم، وتقنيات عمليات التكرير. وتختلف كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون باختلاف نوع الوقود وكفاءته وطريقة الاحتراق. يبين **الجدول 1-3** كمية انبعاثات CO₂ لكل وحدة طاقة أو لكل كمية وقود.

الجدول (1-3): كمية انبعاثات CO₂ حسب نوع الوقود

نوع الوقود	انبعاث CO ₂ كجم/جيجا جول
الفحم (Coal)	90 – 110
النفط الخام (Crude Oil)	70 – 80
الديزل	73 – 75
الغازولين	69 – 72
زيت الوقود الثقيل (HFO)	75 – 78
الغاز الطبيعي	50 – 56
غاز بترولي مسال	60 – 65
الكيروسين (وقود الطائرات)	71 – 73

المصدر: IEA, 2024

تشير دراسة لوكالة الطاقة الدولية إلى أنه يمكن خفض ما يصل إلى 80% من الانبعاثات المحددة لتحقيق أهداف المناخ العالمية بحلول عام 2050 من خلال تدابير تحسين كفاءة الطاقة في قطاع النفط والغاز. كما يمكن من خلال تطبيق الاستراتيجيات الرقمية لتحسين كفاءة الطاقة في مصفاة متوسطة الحجم (200,000 برميل يومياً) أو مصنع بتروكيماويات تحسين الربحية بمقدار يتراوح بين 15 و30 مليون دولار أمريكي سنوياً، وخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون CO₂ بمقدار يتراوح بين 500,000 و900,000 طن متري سنوياً، أي ما يعادل إخراج نحو 200,000 سيارة تعمل بالغازولين من الخدمة. (LAU, C., 2022)

1-6-3: تحسين كفاءة تطبيق برامج الصيانة

إن ما يقدمه تطبيق برنامج الصيانة الدورية والوقائية من تسهيل لعمليات تحديد مواعيد تشغيل وتوقيف بعض المعدات، والتنبؤ بميزان الطلب على المنتجات البترولية وأوقات ذروة الاستهلاك والإنتاج، يساعد إدارة المصفاة على اختيار المواعيد المناسبة لإجراء صيانة بعض المعدات عندما يزداد معدل استهلاكها للطاقة عن الحدود النظامية، وبالتالي فإن كل دولار يُستثمر في الصيانة الوقائية يمكن أن يوفر أضعاف الخسائر الناتجة عن هدر الطاقة، وذلك من خلال الإجراءات التالية:

- التنظيف الدوري للرواسب التي تعيق التبادل الحراري لتحسين كفاءة المبادلات الحرارية.
- تنظيم نسبة الهواء إلى الوقود وإزالة الرواسب من الحراقات لتحسين أداء الأفران.
- قياس الاهتزاز والكشف عن تآكل المراوح لتحسين أداء المضخات والضواغط.
- الكشف الدوري على مصائد البخار وإصلاح الأنابيب والصمامات لتقليل التسربات.
- معايرة أجهزة القياس والتحكم للحصول على قراءات دقيقة وضمان استقرار ظروف تشغيل العمليات، والعمل عند القيم التي تساهم في خفض استهلاك الطاقة.

1-6-4: تحسين صورة الشركة

عندما تلتزم الشركة بتطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة فإنها تبرهن للجمهور أنها مهتمة بالمحافظة على الثروات الوطنية، علاوة على حرصها على حماية البيئة من التلوث.

1-6-5: خلق فرص عمل جديدة

تساهم إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في خلق فرص عمل مباشرة وغير مباشرة ناتجة عن الحاجة إلى يد عاملة لتنفيذ الأعمال اللازمة لتطوير المعدات أو تركيب معدات جديدة. أما الوظائف غير المباشرة فتنشأ عن تنفيذ الخدمات اللازمة لدعم أعمال تصنيع معدات توفير الطاقة وغيرها.

الفصل الثاني

فرص تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط

ترتكز عملية تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط على مجموعة من الاستراتيجيات الأساسية، كتطوير عمليات التكرير بهدف تطبيق تقنيات حديثة تساهم في خفض استهلاك الطاقة، إضافة إلى إجراء مقارنة مرجعية لتحديد مواطن الضعف والبحث عن الحلول المناسبة، إلى جانب تنظيم حملات توعية لتعزيز الوعي بأهمية تحسين كفاءة الطاقة.

تعتبر طريقة المقارنة المرجعية Benchmarking إحدى أدوات إدارة الطاقة في المنشآت الصناعية، حيث تقوم بعض مراكز الأبحاث بإجراء مسح استقصائي لمجموعة متنوعة من المنشآت المتماثلة، باستخدام مؤشرات قياس الأداء التشغيلي والاقتصادي، وتستخدم النتائج لتحديد القيم المثالية لظروف التشغيل واختيار الوسائل المناسبة لتحسين الأداء. فعلى سبيل المثال، تستخدم في مصافي النفط مؤشرات قياس مختلفة كحجم الطاقة التكريرية، ودرجة التعقيد التكنولوجي أو مؤشر تعقيد نيلسون Nelson Complexity Index، ونوع النفط الخام المكرر، وذلك بهدف تحديد القيم المرجعية لمعدلات استهلاك الطاقة في كل جزء من أجزاء المصفاة للاستفادة منها في تقييم الأداء مقارنة بالمصافي الأخرى المماثلة، وتحديد العوامل المساعدة على خفض استهلاك الطاقة، وصياغة الأهداف، واختيار المشاريع الأنسب لخفض استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها. (IPIECA, 2023)

لا توجد طريقة واحدة، أو تقنية معينة يمكن الاعتماد عليها لتعظيم كفاءة الطاقة، إنما لكل منشأة خصوصيتها التي تفرض حلولاً قد تختلف كلياً أو جزئياً عن الحلول المطبقة في منشأة أخرى مشابهة لها في طبيعة الأعمال. (Rossiter, P., Jones, P., 2015)

2-1: تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة

تُصنف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة إلى عدة فئات بناءً على طبيعتها، ومدى تعقيد تنفيذها، وتكلفتها، وتأثيرها. يساعد هذا التصنيف على تحديد أولويات الإجراءات ضمن أنظمة إدارة الطاقة مثل معيار ISO 50001.

2-1-1: التصنيف حسب حجم التكاليف

تُصنف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة حسب حجم التكاليف إلى إجراءات منخفضة التكاليف وإجراءات متوسطة وأخرى مرتفعة. (Kalinenko, K & Cavkov, M., 2021)

• إجراءات منخفضة التكاليف

وهي إجراءات سهلة، منخفضة أو معدومة التكلفة، وقد تتطلب الحد الأدنى من الاستثمار، ويمكن تنفيذها خلال مدة زمنية قصيرة، وتتعلق بتحسين كيفية تشغيل الأنظمة الحالية، مثل تحسين قيم ضبط العمليات (درجة الحرارة، الضغط)، أو تقليل وقت تشغيل المعدات في وضع الخمول، أو تحسين الجدولة وإدارة الأحمال، أو الكشف عن التسريبات وإصلاحها (البخار، الهواء المضغوط، الغاز)، أو تنظيف المبادلات الحرارية والغلايات، أو إصلاح العزل الحراري، أو تطبيق برامج الصيانة الوقائية/التنبؤية.

• إجراءات متوسطة التكاليف

وهي إجراءات تتضمن تحديث أو استبدال المعدات الحالية، مثل استخدام محركات ومضخات عالية الكفاءة، وإنشاء أنظمة استرجاع الحرارة المهدرة، وتركيب أنظمة احتراق متطورة.

• إجراءات كثيفة التكاليف

تتضمن إجراء تعديلات جوهرية على العمليات أو دمج تقنيات جديدة، مثل تعزيز تكامل العمليات (تحليل نقطة الاختناق)، وتركيب أنظمة التوليد المشترك للحرارة والطاقة (CHP) وتعظيم استخدام الطاقة الكهربائية في عمليات التسخين (كهربة العمليات)، ودمج الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الهيدروجين الأخضر)

2-1-2: التصنيف حسب نظام الاستخدام

يعتمد هذا التصنيف على مبدأ عمل أنظمة الطاقة الحرارية، والغلايات، والأفران، والمبادلات الحرارية، وفيما يلي أهم الإجراءات:

- أنظمة الطاقة الحرارية: تتضمن استعادة الحرارة، وتحسين الاحتراق، وتحسين العزل.
- الأنظمة الكهربائية: مثل المحركات، المضخات، الضواغط، وتتضمن رفع كفاءة المحركات، وتصحيح معامل القدرة، وإدارة الأحمال الذكية.
- أنظمة المرافق: مثل البخار، الهواء المضغوط، مياه التبريد، وتتضمن إدارة مصائد البخار، وتحسين أداء الضواغط، ورفع كفاءة أبراج التبريد.
- المباني وأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء: ينطبق على المكاتب والبنية التحتية الداعمة، وأهم التدابير، تحسين أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء، استخدام إضاءة موفرة للطاقة (LED)، وتحسين العزل الحراري للمبنى.

2-1-3: التصنيف حسب التأثير على أداء الطاقة

- تدابير كفاءة الطاقة، مثل خفض استهلاك الطاقة لكل وحدة إنتاج
- تدابير ترشيد الطاقة، مثل خفض الاستهلاك المطلق للطاقة
- تدابير استعادة الطاقة، مثل استرجاع الطاقة المهدرة وإعادة استخدامها
- تدابير استبدال الطاقة، مثل استبدال أنواع الوقود عالية الكربون ببدايل أنظف

2-1-4: التصنيف حسب الهدف الاستراتيجي

- تدابير خفض التكاليف، مع التركيز على تقليل النفقات التشغيلية
- تدابير خفض الانبعاثات، وتستهدف خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والغازات الدفيئة
- تدابير الموثوقية والكفاءة، وتشمل تحسين وقت تشغيل النظام وأدائه
- تدابير الامتثال، وتشمل تلبية متطلبات معايير نظام إدارة الطاقة ISO 50001، وأهداف الحوكمة البيئية والاجتماعية والمؤسسية.

يبين الشكل 1-2 تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط

الشكل (2-1): تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط



المصدر: Lizot, M., et al., 2023

تختلف طرق تصنيف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في خصائصها، حيث أن معظم شركات التكرير تفضل التصنيف الزمني في ترتيب أوليات التنفيذ حسب أهمية الفرص. أما التصنيف حسب نظام الاستخدام فيتميز بمرونة استخدام الأدوات والموارد والبرامج اللازمة لتنفيذ الفرص. وقد تلجأ بعض الشركات إلى اعتماد أكثر من طريقة عند تنفيذ برنامج تحسين كفاءة الطاقة، أو تحديد الموارد المادية والبشرية التي سيتم استخدامها، وذلك بهدف الحصول على الفوائد التي تمنحها كل طريقة.

وبما أن لكل مصفاة خصائصها المختلفة، فإنه لا بد من اختيار فرص تحسين كفاءة الطاقة على أساس الواقع الفعلي، ودراسة الظروف المحيطة بالمصفاة بدقة. (Lizot, M., et al., 2023)

كما في معظم الصناعات الأخرى، لا يمكن الوصول إلى قيمة مثالية لكفاءة الطاقة في صناعة التكرير خلال فترة زمنية محددة، إنما هي عملية مستمرة تحتاج إلى تضافر كافة الإمكانيات من الهندسة الابتكارية، والإدارة الجيدة للموارد، والتوظيف الأمثل للاستثمارات.

بشكل عام يمكن تحسين كفاءة الطاقة حسب تصنيف الدوائر والأقسام من خلال تطبيق أربع فئات مختلفة من الإجراءات، كتحسين ظروف التشغيل، أو تحسين عمليات الصيانة، أو تعديل التصميم الهندسي، أو استخدام التكنولوجيا الحديثة. وكل فئة من هذه الفئات تتبع لدائرة أو قسم مختلف لإدارة العمليات، أو إدارة الصيانة، أو إدارة البحث والتطوير.

كما تتوزع نسب فرص تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط من حيث المواقع المحتملة في كل من الوحدات المساندة، كمولدات البخار ومحطات توليد الطاقة الكهربائية، وفي أفران العمليات، وتعظيم ظروف تشغيل وتحسين أداء عمليات التكرير، وتحسين التكامل في المبادلات الحرارية. تتباين هذه المواقع فيما بينها من حيث حجم التكاليف اللازمة لتنفيذ فرص تحسين كفاءة الطاقة، وتصنف الوحدات المساندة والمبادلات الحرارية وأفران العمليات بأنها المواقع التي تحتاج فرص تحسين كفاءة الطاقة فيها إلى تكاليف منخفضة مقارنة بالمواقع الأخرى.

2-2: تحسين كفاءة عمليات تكرير النفط.

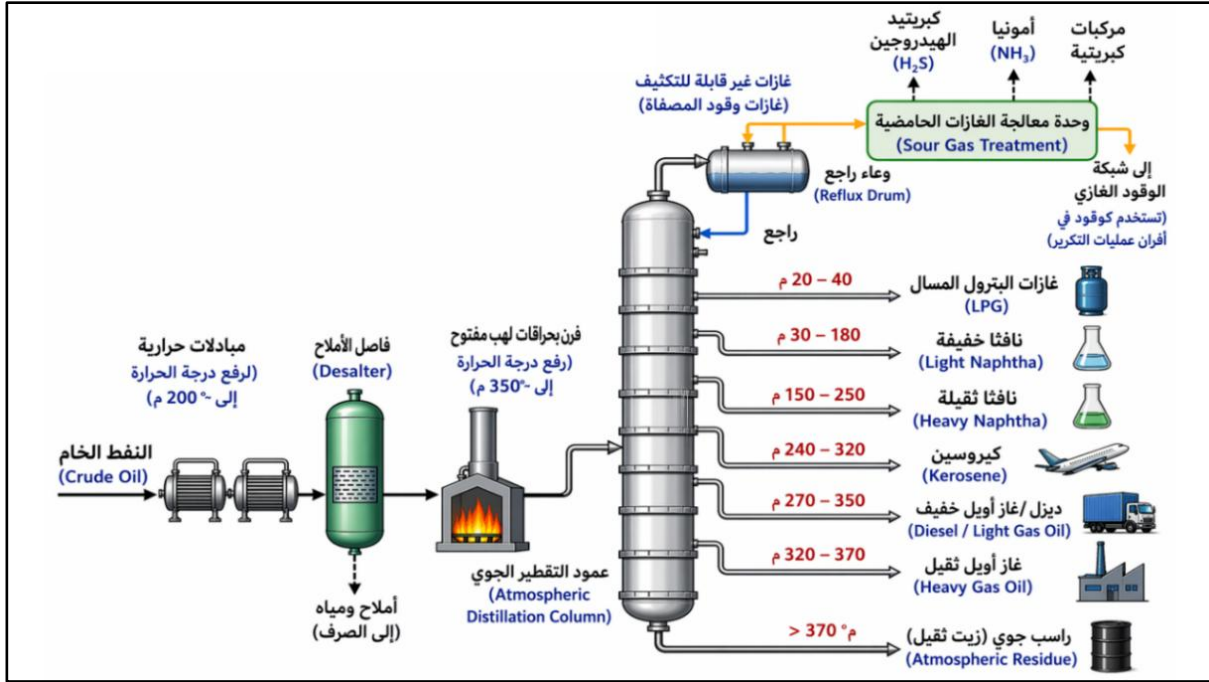
تختلف فرص تحسين كفاءة الطاقة في عمليات تكرير النفط حسب نوع العملية، فمنها ما يعتمد على الفصل، ومنها ما يعتمد على المعالجة بوجود محفزات، ومنها ما يتضمن تفاعلات ناشرة للحرارة وأخرى ماصة للحرارة. وفيما يلي شرح لأهم فرص تحسين كفاءة الطاقة في عمليات التكرير الرئيسية.

1-2-2: تقطير النفط الخام Crude Distillation

تعتبر عملية تقطير النفط الخام من أكبر مراكز استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط، حيث تمثل نحو 22% من إجمالي الطاقة المستهلكة في المصفاة. (Zein., S., et al., 2026)

يدخل النفط الخام عبر مبادلات حرارية لرفع درجة حرارته إلى نحو 200 °م يمر خلالها عبر فاصل الأملاح ثم يدخل بعدها إلى فرن بحراقات لهب مفتوح لرفع درجة حرارته إلى 350 °م ومنه إلى عمود تقطير، حيث يفصل إلى عدة منتجات حسب درجة الكثافة. **الشكل 2-2** مخطط سير عملية التقطير الجوي.

الشكل (2-2): مخطط سير عملية التقطير الجوي



المصدر: Zein., S., et al., 2026

تتشكل في وعاء راجع أعلى عمود التقطير Reflux Drum غازات تسمى غازات وقود المصفاة، تتكون بشكل رئيسي من الميثان، والإيثان، وكبريتيد الهيدروجين، والأمونيا. تسحب هذه الغازات إلى وحدة معالجة الغازات الحامضية Sour Gas Treatment، لنزع المركبات الكبريتية منها، ثم تحويلها إلى شبكة الوقود الغازي لتستخدم كوقود في أفران عمليات التكرير.

أما وحدة التقطير الفراغي فتستخدم لتجزئة متبقي عمود التقطير الجوي، وذلك للحصول على منتجات أخف مثل زيت الغاز الفراغي الخفيف والثقيل Light and Heavy Vacuum Gas Oil، والتي تطبق عليها عمليات لاحقة لإنتاج زيوت التزيت Lube Oils، أو تستخدم كلقيم في وحدات التكسير الحفزي المائع FCC. وتعتمد نظرية الفصل تحت الضغط الفراغي على مبدأ تخفيض درجة غليان المخلفات الثقيلة إلى قيمة تتراوح بين 380°م إلى 405°م، وهي الدرجة التي لا يحدث فيها تغيرات كيميائية أو تفاعلات تكسير للمركبات الهيدروكربونية، ينتج عنها تشكل الفحم الذي يؤدي إلى انسداد أنابيب الفرن والأجزاء الداخلية لعمود التقطير والمبادلات الحرارية. يتم تخفيض ضغط برج التقطير الفراغي عن طريق مفرغات بخارية Steam Ejectors. يبين الشكل 2-3 مخطط سير عملية التقطير الفراغي.

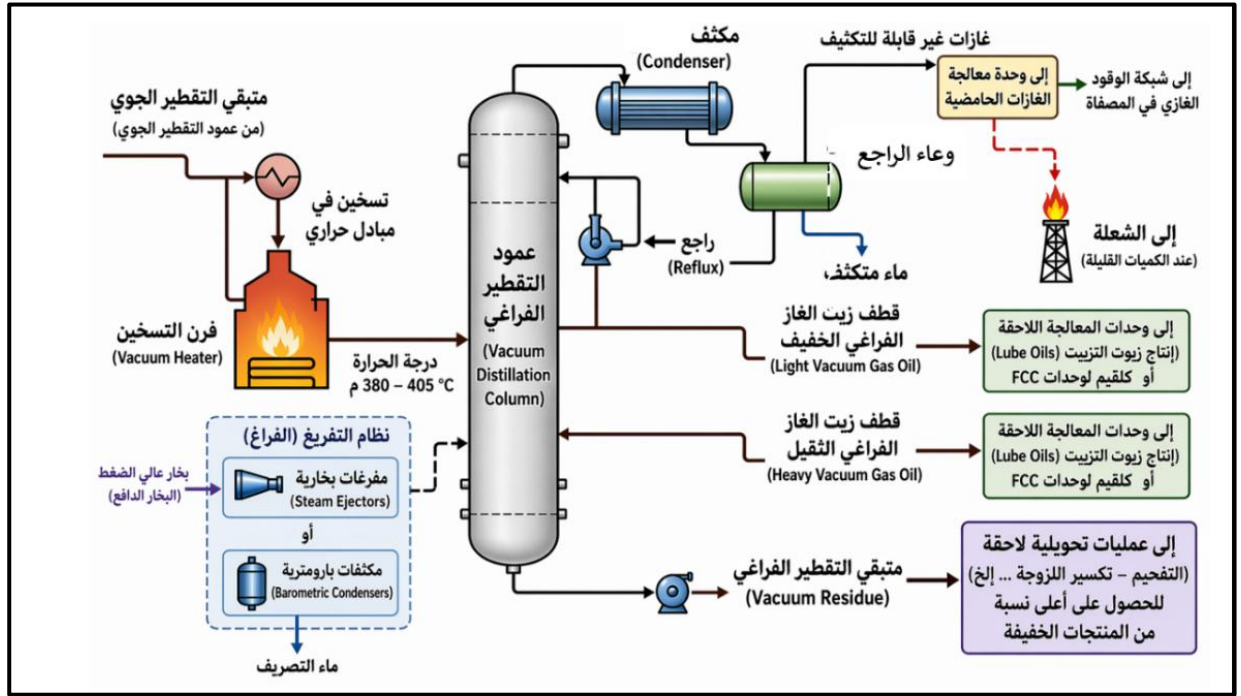
يسحب متبقي عملية التقطير الفراغي من قاع عمود التقطير لتجرى عليه عمليات تحويلية لاحقة كالتفحيم وتكسير اللزوجة، وذلك للحصول على أعلى نسبة من المنتجات الخفيفة.

وفيما يلي أهم الخيارات الممكنة لتحسين كفاءة الطاقة في وحدة تقطير النفط الخام.

• **تحسين أداء فاصل الأملاح**

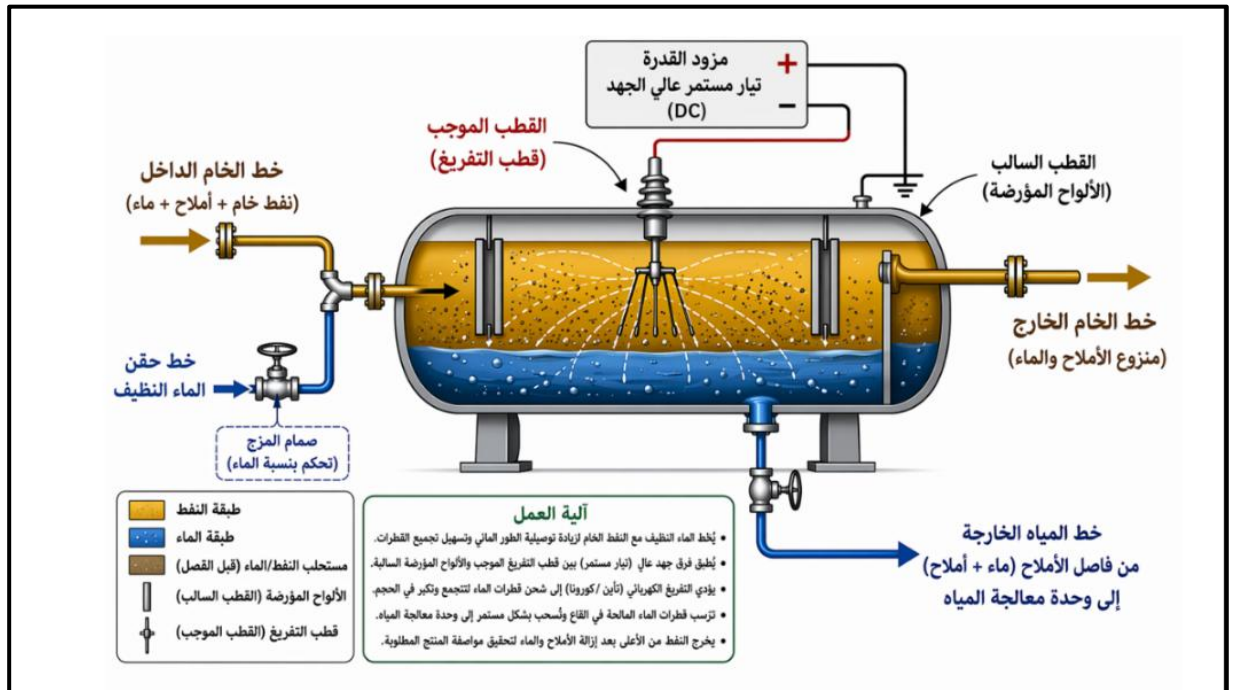
يتكون فاصل الأملاح من وعاء يحتوي على أقطاب كهربائية يركب على خط النفط الخام الداخل إلى وحدة التقطير لنزع الأملاح والرواسب من النفط قبل دخولها إلى أوعية الوحدة. الشكل 2-4

الشكل (2-3): مخطط سير عملية التقطير الفراغي



المصدر: Zein., S., et al., 2026

الشكل (2-4): مخطط فاصل الأملاح الكهربائي



المصدر: Mani, V., 2025

يمكن تخفيض استهلاك الطاقة في فاصل الأملاح من خلال الإجراءات التالية:

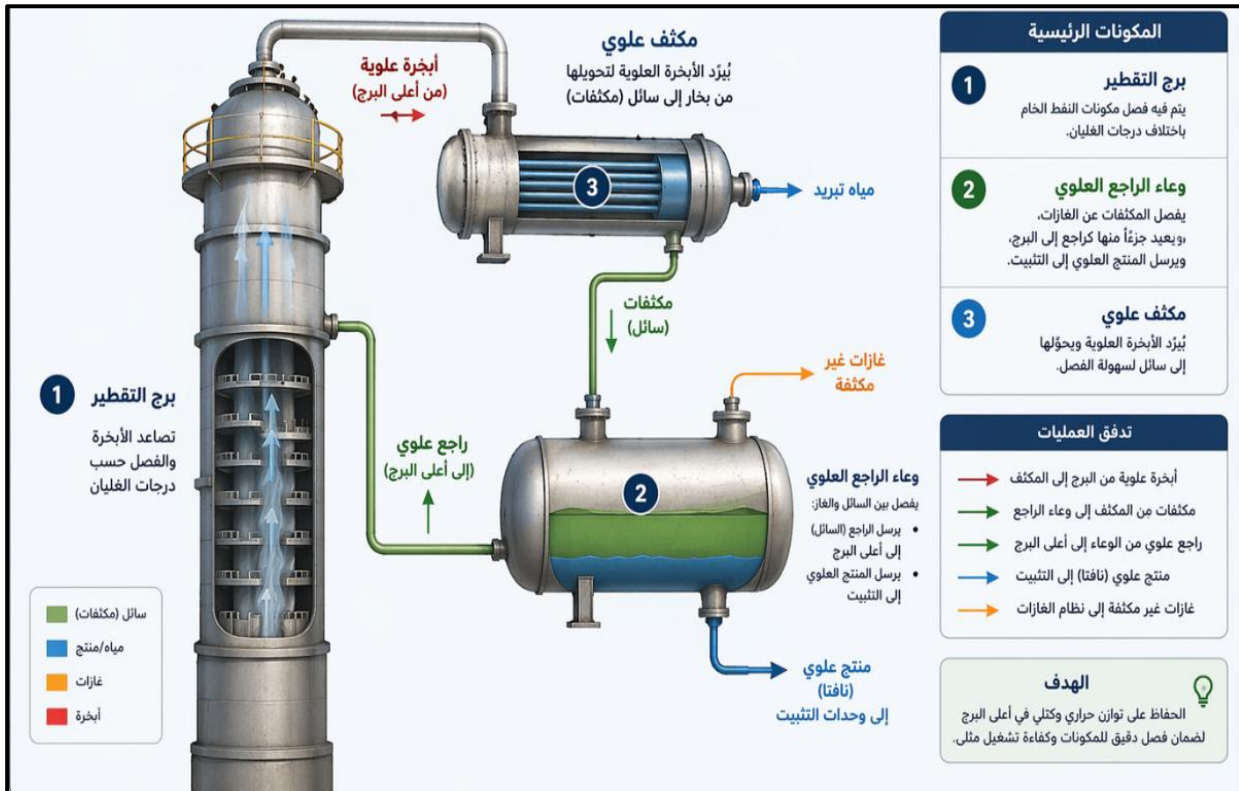
- تحسين كفاءة الأقطاب الكهربائية بإجراء الكشف الدوري عليها للتأكد من عدم وجود تشوهات أو اهتراءات، إضافة إلى الكشف على محاولات التيار الكهربائي وملحقاتها.

- ضبط كمية المياه المعالجة المحقونة عند القيمة المثالية، فزيادة الكمية أحياناً عن الحد المطلوب تؤدي إلى تراجع كفاءة فصل الأملاح من النفط الخام.
- التأكيد على ضرورة ترقيد النفط الخام مدة كافية من الزمن في الخزانات الأولية لضمان أقل نسبة ممكنة من المياه المرافقة للنفط الخام قبل إدخاله إلى فاصل الأملاح.
- الكشف على العازل الحراري لفاصل الأملاح وخطوط الأنابيب المرتبطة به.

• تنظيم نسبة راجع أعلى برج التقطير

يلجأ المشغل أحياناً إلى تثبيت كمية الراجع العلوي لعمود التقطير Overhead Reflux عند قيمة عالية، لتحسين عملية الفصل في البرج، وخفض نسبة المواد الثقيلة في المنتج العلوي، فتنحسّن قيمة المنتج، وتزداد كمية المنتج السفلي، إلا أن هذه الزيادة ليست خطية، حيث أنها تبدأ بالتناقص عندما تصل كمية المادة المارة عبر مسخن أسفل عمود التقطير إلى معدل يتطلب عنده طاقة حرارية إضافية للتسخين، مما يشكل هدراً للطاقة. ولتفادي هذه المشكلة وضمان تخفيض استهلاك الطاقة في عمود التقطير إلى الحد الأدنى، مع المحافظة على جودة مواصفات المنتجات، يجب تنظيم كمية الراجع عند القيمة المثالية بدقة عالية، وذلك باستخدام أجهزة تحكم متطورة. يبين الشكل 2-5 مخطط مكونات منظومة أعلى برج التقطير وملحقاته.

الشكل (2-5): مخطط مكونات منظومة أعلى برج التقطير وملحقاته



المصدر: Rafeek, M., et al., 2025

• الالتزام بالحد المطلوب لفصل المنتجات

قد يكون رفع درجة نقاوة المنتجات إلى أعلى من الحد المطلوب أمراً جيداً في بعض الحالات، إلا أنه في حالات عديدة يؤدي إلى زيادة غير مبررة في استهلاك الطاقة، فعندما تكون النقاوة المطلوبة

95% ويرفعها المشغل إلى 98% فهذا يؤدي إلى زيادة نسبة راجع أعلى عمود التقطير عن القيمة المطلوبة، وبالتالي زيادة الحمل الحراري على مسخن أسفل عمود التقطير وارتفاع في استهلاك الطاقة.

• تحسين التكامل الحراري

يستفاد من الحرارة الكامنة في المنتجات الخارجة من عمود التقطير في تسخين النفط الداخل إلى الفرن بواسطة التبادل الحراري بين النفط الخام وخطوط المواد البترولية المراد تبريدها، فتنخفض بذلك كمية الوقود المستهلكة في الفرن من خلال رفع درجة حرارة النفط الخام، فضلاً عن توفير في مقدار تكلفة إنشاء الفرن نتيجة تخفيض حجمه. كما يستفاد من عملية التكامل في توفير الطاقة اللازمة لتبريد المنتجات من خلال نقلها إلى النفط الخام. قد يتغير معدل التبادل الحراري نتيجة حدوث تعديلات في الوحدة كتغيير نوع النفط الخام المكرر، فعلى سبيل المثال، لوحظ في وحدة تقطير طاقتها 90 ألف ب/ي إمكانية رفع درجة حرارة النفط الخام الداخل إلى الفرن بمقدار 10°م، أو ما يعادل 14 ألف وحدة حرارية بريطانية في الساعة، وذلك بإجراء التعديلات التالية:

- نقل المبادل E-4A/B من موقعه السابق الذي كان يستخدم لرفع درجة حرارة النفط الخام قبل دخوله إلى فاصل الأملاح بالتبادل مع الراجع الداخلي لبرج التقطير الجوي، إلى ما بعد المبادل الحراري E-6 A/B
- إضافة مبادل حراري جديد E-X1A/B للاستفادة من حرارة الراجع الجانبي لبرج التقطير الفراغي في رفع درجة حرارة النفط الخارج من المبادل E6-A/B
- تعديل حجم المبادل الحراري E-10 لرفع طاقته الحرارية بمقدار 10.1 ألف وحدة بريطانية/الساعة.
- الاستغناء عن المبادل الحراري E-16 وتحويله إلى مبادل احتياطي لتسخين مياه تغذية المراجل البخارية وتبريد زيت الغاز الفراغي المنتج قبل دخوله إلى E-15.

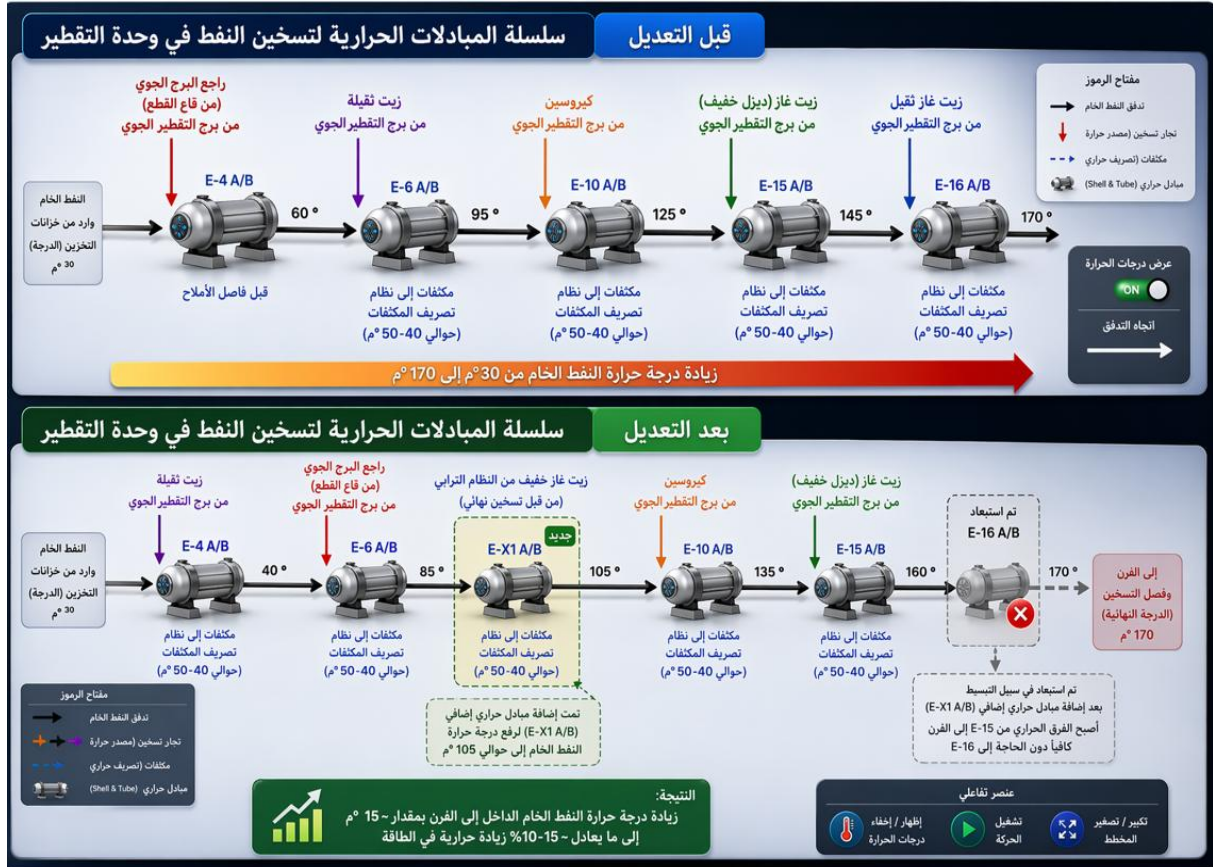
بلغت تكلفة التعديل نحو 3.3 مليون دولار أمريكي، وساهم في توفير نحو 1.06 مليون دولار أمريكي في السنة، وزمن استرداد رأس المال 3.1 سنة. (Rossiter, P., & Jones, P. 2015)

يبين الشكل 2-6 سلسلة المبادلات الحرارية لتسخين النفط في وحدة التقطير قبل وبعد التعديل.

• تعديل الأجزاء الداخلية لعمود التقطير

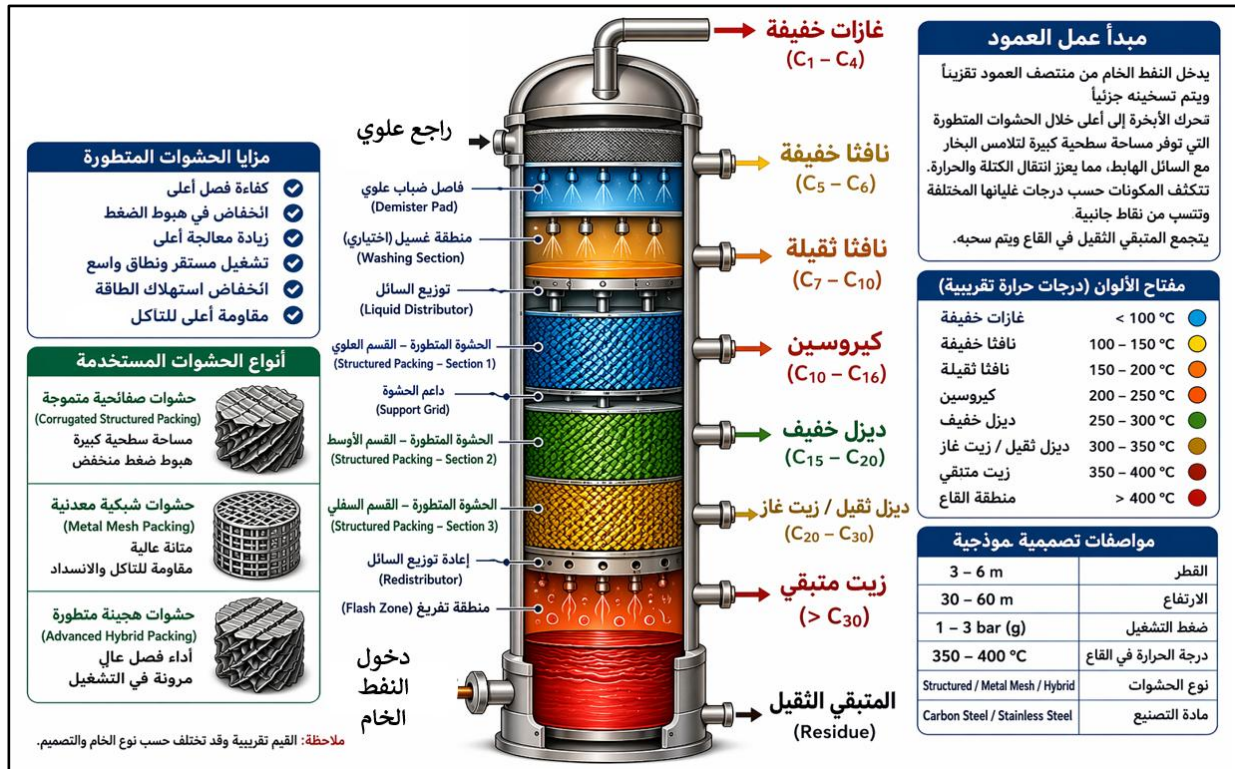
تؤثر جودة الأجزاء الداخلية لعمود التقطير على معدل استهلاك الطاقة. فعلى سبيل المثال، عندما تتحطم بعض أجزاء من الصواني أو المجمعات تنخفض كفاءة الفصل، ويزداد فرق الضغط عبر العمود، مما يستوجب تشغيل العمود بنسبة راجع علوي مرتفعة، وبالتالي ترتفع تكاليف الطاقة المستهلكة. ولتفادي هذه المشكلة ينصح بإجراء فحص دوري للكشف عن الأعطال وإصلاحها، أو استبدال الأجزاء الداخلية القديمة بأنواع متطورة عالية الأداء يمكن من خلالها الحصول على كفاءة فصل عالية بنسبة راجع أقل، وبفرق ضغط عبر العمود أدنى، مما يساعد على تخفيض معدل استهلاك الطاقة. ويبين الشكل 2-7 مخطط الأجزاء الداخلية لعمود التقطير بحشوات متطورة.

الشكل (2-6): سلسلة المبادلات الحرارية لتسخين النفط في وحدة التقطير قبل وبعد التعديل



المصدر: Rossiter, P., & Jones, P. 2015

الشكل (2-7): مخطط الأجزاء الداخلية لعمود التقطير بحشوات متطورة



المصدر: Blauth, S., et al., 2024

• ضبط معدل حقن بخار الماء في برج فصل المواد الخفيفة Stripper

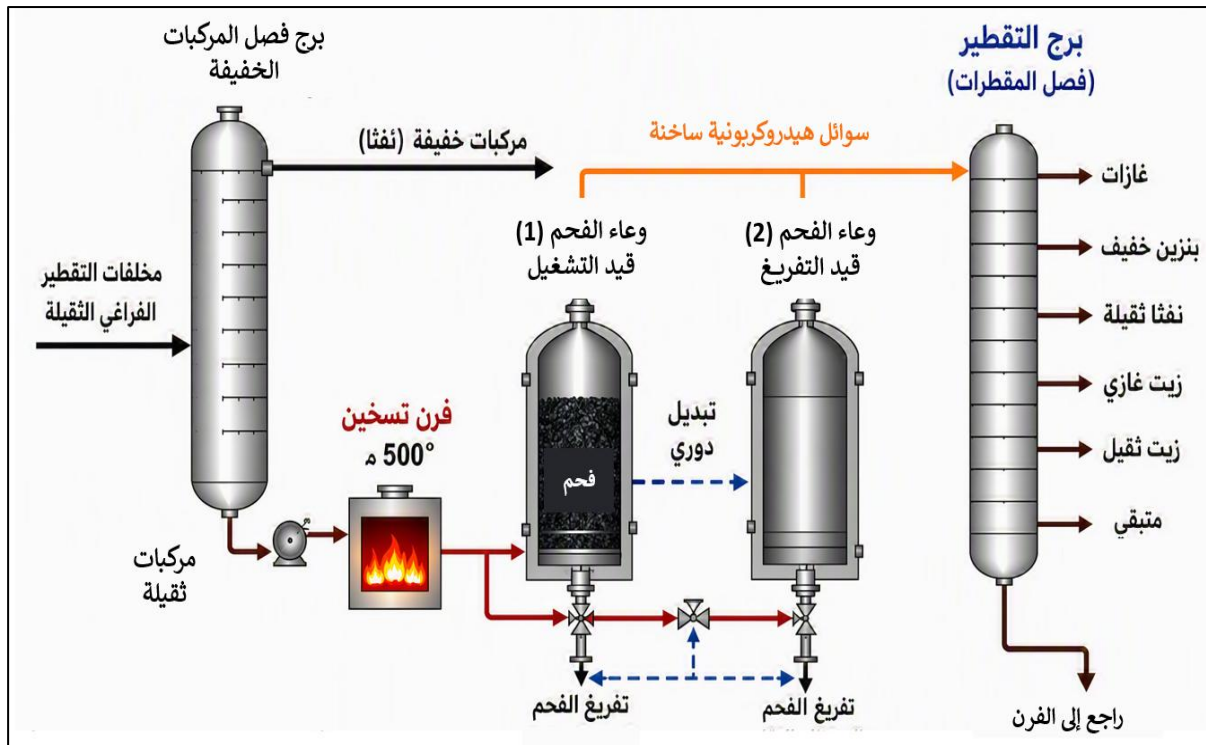
يحقن بخار الماء في أبراج النزع لتعزيز فصل المركبات الهيدروكربونية الخفيفة عن السائل، إضافة إلى تعديل خصائص المنتج، كدرجة الاشتعال أو درجة بداية الغليان. إن استعمال كمية زائدة من البخار أو رفع درجة حرارته إلى قيمة عالية قد لا يكون مفيداً، بل يعتبر شكلاً من أشكال هدر الطاقة. ويمكن الاستعاضة عن جزء كبير من كمية بخار النزع بتعديل ظروف تشغيل البرج، كتغيير معدل سحب المنتج أو تعديل درجة حرارة الصينية التي يسحب منها المنتج.

2-3-2: عملية التفحيم المؤجل Delayed Coking

تهدف عملية التفحيم المؤجل إلى تحويل مخلفات التقطير الفراغي الثقيلة إلى مشتقات خفيفة، وينتج عنها فحم بترولي يستخدم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية، أو لصناعة الأقطاب الكهربائية.

يدخل اللقيم أولاً إلى برج التقطير لنزع المركبات الخفيفة منه، ثم تسحب المركبات الثقيلة من قاع البرج لتسخن في فرن إلى حوالي 500°م، ثم تحول إلى الوعاء الذي يتشكل فيه الفحم. وعندما يمتلئ الوعاء يحول اللقيم إلى وعاء آخر فارغ، ثم يفرغ الوعاء الأول، وتتم العملية بشكل دوري. أما الأبخرة الساخنة المنطلقة من أعلى وعاء الفحم فتحول إلى برج تقطير لفصلها إلى مقطرات تطبق عليها عمليات معالجة لاحقة. يبين الشكل 8-2 مخطط سير عملية التفحيم المؤجل.

الشكل (8-2): مخطط سير عملية التفحيم المؤجل



المصدر: Shahin, M., et al., 2024

يمكن تحسين كفاءة الطاقة في وحدة التفحيم المؤجل من خلال الإجراءات التالية:

• خفض كمية الحرارة اللازمة للتسخين

يمكن خفض كمية الحرارة اللازمة للتسخين في عملية التفحيم من خلال تطبيق مجموعة من الإجراءات، أهمها:

- تركيب مبرد لمنتج أعلى عمود التقطير لخفض درجة حرارة المادة الداخلة إلى المكثف
- استخدام أجزاء داخلية ذات كفاءة فصل عالية في عمود التقطير
- تعظيم نسبة اللقيم القادم إلى وحدة التفحيم من وحدة التقطير الفراغي مباشرة، وخفض نسبة اللقيم القادم من الخزانات، للاستفادة من حرارة اللقيم قبل تبريده في الخزانات.

• خفض معدل استهلاك وقود الأفران

عندما يترسب الفحم على الجدران الداخلية لأنابيب مرور اللقيم عبر الفرن تتشكل طبقة عازلة تعيق انتقال الحرارة عبر الأنابيب، فتزداد كمية الوقود اللازمة للوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة للمادة الخارجة من الفرن. يبين الشكل 2-9 طبقة الفحم المترسبة على السطح الداخلي لأنابيب فرن التفحيم.

الشكل (2-9): طبقة الفحم المترسبة على السطح الداخلي لأنابيب فرن التفحيم المؤجل



المصدر: Ramasamy, M., & Deshannavar, U., 2016

كما يمكن خفض استهلاك الوقود في أفران عملية التفحيم المؤجل بتطبيق الإجراءات التالية:

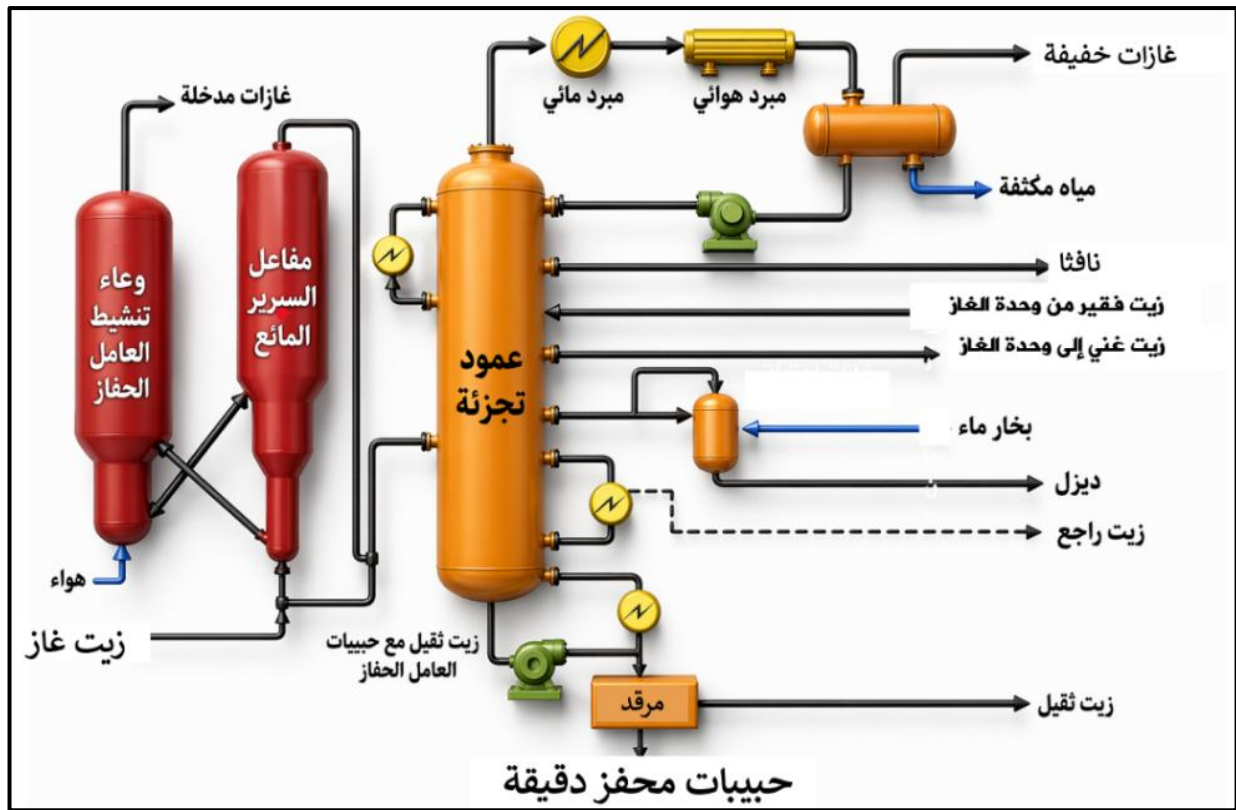
- تركيب حراقات عالية الكفاءة
- تركيب أجهزة متطورة للتحكم بنسبة هواء الاحتراق
- تركيب مسخن أولي لهواء الاحتراق قبل دخوله إلى حراقات الفرن.
- تحسين العزل الحراري لجدران الفرن والأنابيب الخارجة والداخلية لتفادي فقد الحرارة إلى الجو.

2-3-3: عملية التكسير الحفزي المائع

تصنف عملية التكسير الحفزي المائع Fluidized Catalytic Cracking- FCC في فئة العمليات التي تحول المنتجات الثقيلة إلى مشتقات خفيفة عالية القيمة، وذلك من خلال تفاعلات التكسير الحراري للجزيئات الثقيلة إلى جزيئات صغيرة بوجود محفز داخل مفاعل.

يجري التلامس بين اللقيم الساخن والمحفز داخل المفاعل، ويكون المحفز على شكل حبيبات دقيقة، بحيث يكتسب العديد من خصائص المائع عند اختلاطه بالأبخرة. يفصل بعد ذلك المحفز من الأبخرة الهيدروكربونية المتفاعلة، وتزال أي كمية من الزيت المتبقي على سطح المحفز بواسطة بخار ماء النزغ Stripping steam. بعد ذلك تؤخذ نواتج التكسير إلى برج تقطير حيث يتم فصلها إلى عدد من المنتجات حسب الرغبة. أما المحفز فيؤخذ إلى وعاء منفصل لتنشيطه بحرق الفحم المترسب على سطحه. يبين الشكل 10-2 مخطط سير عملية التكسير الحفزي المائع.

الشكل (10-2): مخطط سير عملية التكسير الحفزي المائع



المصدر: Atukpa, T., et al., 2026

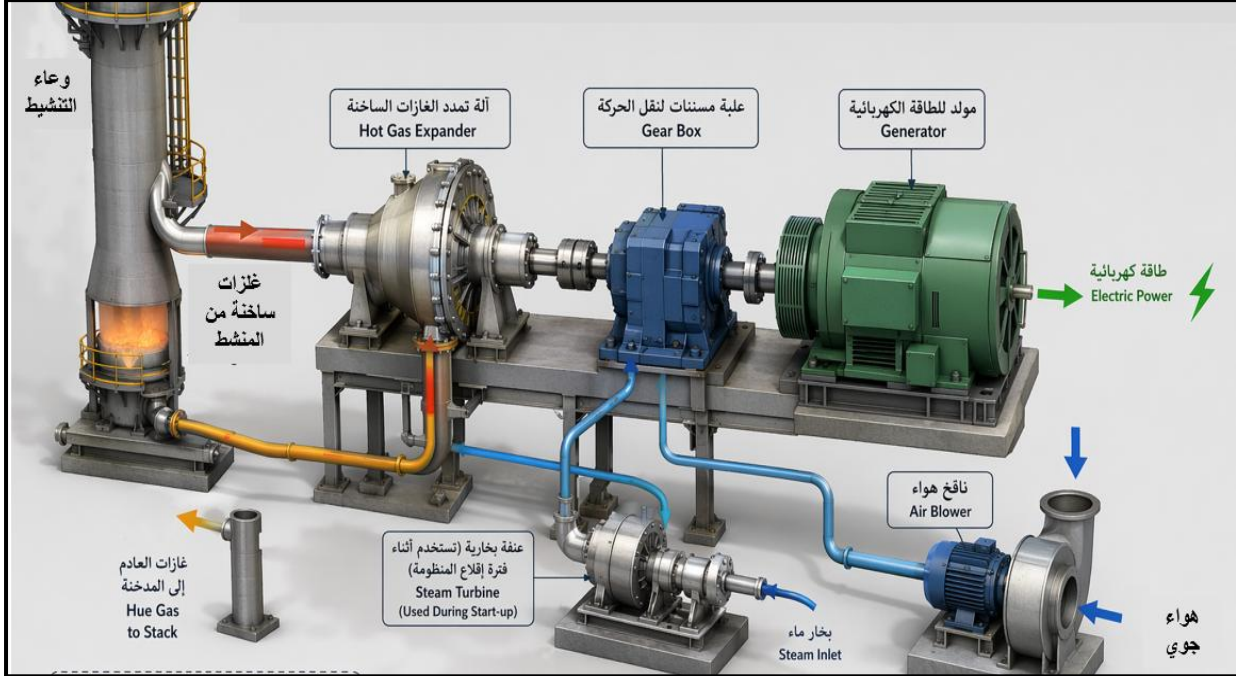
وفيما يلي أهم فرص تحسين كفاءة الطاقة في عملية التكسير الحفزي المائع:

• تركيب منظومة استرجاع الطاقة من غازات تنشيط المحفز

ينتج عن عملية تنشيط المحفز كمية كبيرة من الطاقة الكامنة في غازات احتراق الكربون المترسب على سطح حبيبات المحفز، ويمكن الاستفادة من هذه الحرارة في توليد بخار ماء أو طاقة كهربائية تساهم في تحسين كفاءة الطاقة في المصفاة.

تتكون المنظومة من آلة تمدد الغازات الساخنة Hot Gas Expander، ونافخ هواء Air Blower، وعنفة بخارية تستخدم أثناء فترة إقلاع المنظومة، ومولد للطاقة الكهربائية، وعلبة مسننات لنقل الحركة Gear Box. كما هو مبين في الشكل 2 - 11

الشكل (2-11): منظومة استرجاع الطاقة من غازات تنشيط المحفز في وحدة التكسير الحفزي المائع (FCC)



المصدر: Atukpa, T., et al., 2026

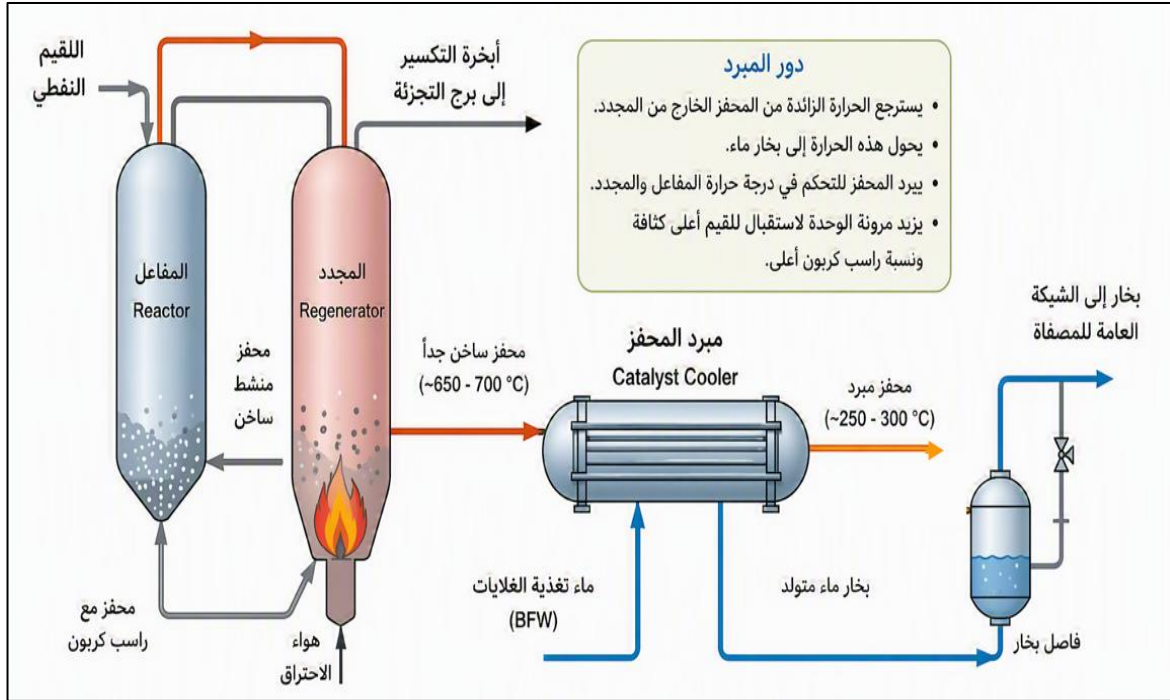
من أهم فوائد منظومة استرجاع الطاقة من غازات تنشيط المحفز أنها تخفض استيراد الطاقة الكهربائية من الشبكة العامة، كما تساعد في تخفيض حمل وحدات التوليد القائمة في المصفاة بمعدل يمكن أن يصل إلى 3 ميجاوات ساعة تبعاً لطاقة الوحدة ونوع النفط الخام المكرر في المصفاة.

• تركيب مبرد للمحفز

يمكن الاستفادة من الحرارة الناتجة عن تفاعلات التكسير في توليد بخار الماء وتحويله إلى الشبكة العامة، وذلك بتركيب مبادل حراري يسمى مبرد المحفز. ويساهم هذا المبرد في تحسين مرونة الوحدة في استقبال لقيم بدرجة كثافة ونسبة راسب كربون أعلى، حيث يمكن التحكم بدرجة حرارة المحفز التي تتغير تبعاً لنسبة راسب الكربون في اللقيم.

قدرت كمية الطاقة الحرارية المتولدة من تركيب مبرد المحفز في إحدى المصافي البريطانية بحوالي 65 مليون وحدة حرارية بريطانية في الساعة، أو ما يعادل 25 طن/الساعة من بخار الماء، وتعادل أيضاً 210 ألف دولار في السنة، وزمن استرداد رأس المال سنتين فقط، وذلك في وحدة طاقتها الإنتاجية 70 ألف ب.ي. يبين الشكل 2-12 موقع مبرد المحفز ودوره في توليد البخار

الشكل (2-12): موقع مبرد المحفز ودوره في توليد البخار

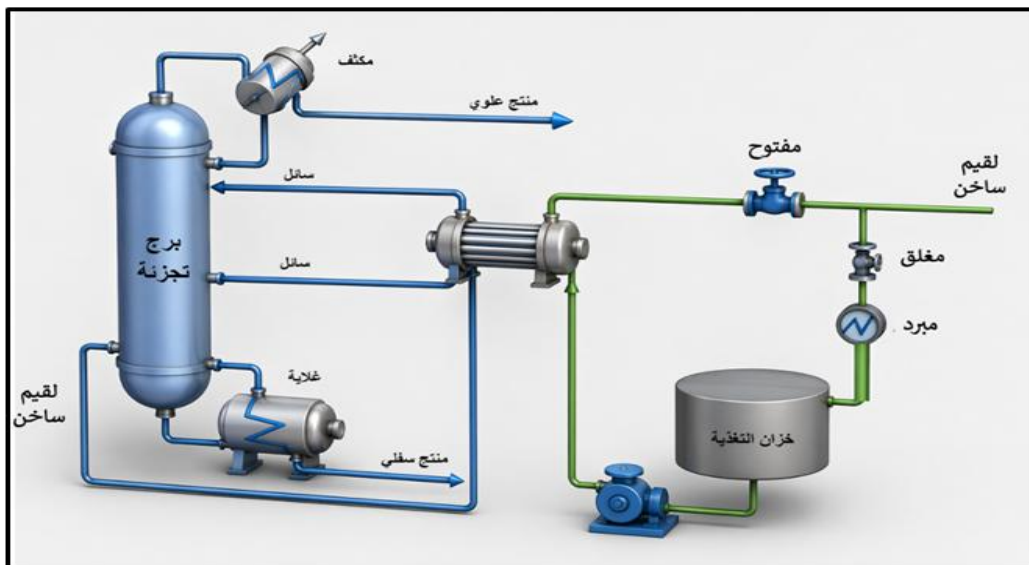


المصدر: Atukpa, T., et al., 2026

• إدخال اللقيم الساخن

تصمم معظم وحدات التكسير الحفزي المائع بشكل تستقبل اللقيم من خزانات وسطية إلا أن هذه الطريقة تسبب هدراً للطاقة. وقد أظهرت مراجعة التصميم الهندسية وظروف التشغيل إمكانية رفع درجة حرارة اللقيم دون أن تتأثر طاقة المبادل الحراري أو ظروف عمل برج التقطير. وقد أدى هذا التعديل إلى توفير ما يعادل 600 ألف دولار أمريكي في السنة، دون الحاجة إلى دفع أية تكاليف استثمارية، حيث لم تتطلب العملية سوى إغلاق الصمام الداخل إلى خزان اللقيم والمبرد وفتح الصمام على الخط الجانبي الذي يسمح بدخول اللقيم الساخن مباشرة إلى المبادل الحراري. كما هو مبين في الشكل 2-13

الشكل (2-13): مخطط دخول اللقيم إلى عملية التكسير الحفزي المائع

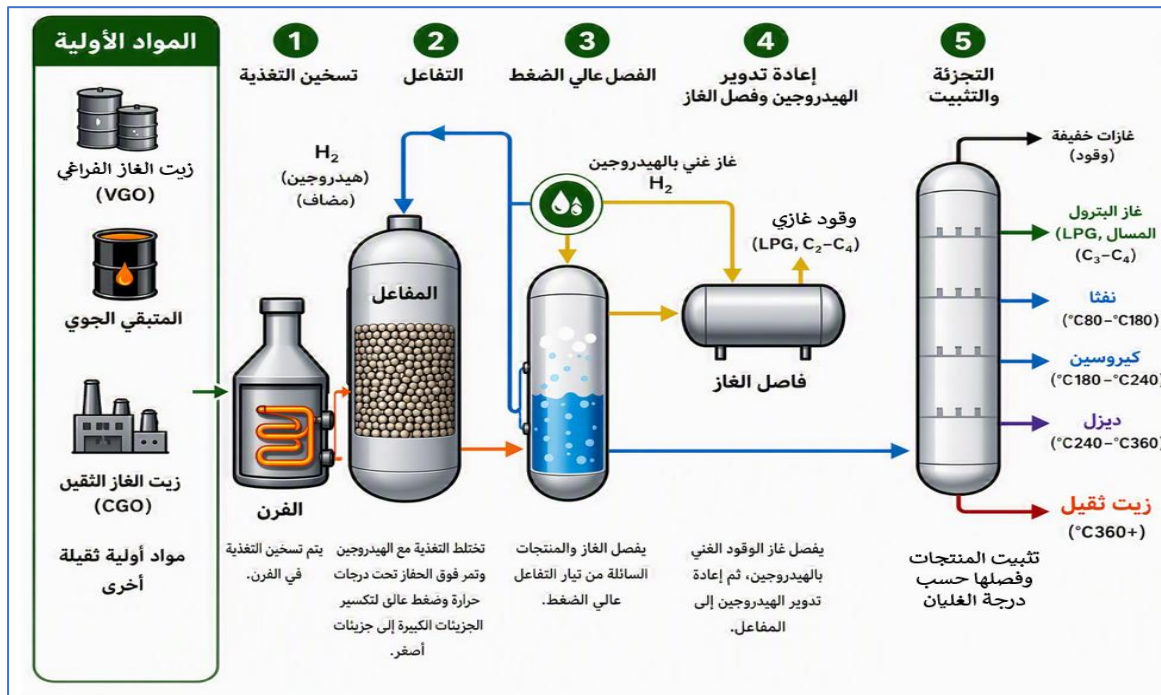


المصدر: Ibrahim, D., 2025

4-2: عملية التكسير الهيدروجيني Hydrocracking

تتم عملية التكسير الهيدروجيني في مفاعل ذي سرير ثابت Fixed bed تحت ضغط مرتفع ودرجة حرارة تصل إلى نحو 400°م بوجود الهيدروجين. ويرتبط الجزء الرئيسي من استهلاك الطاقة في هذه العملية بتسخين، وضخ، ورفع ضغط السائل إلى القيم المناسبة لتفاعلات التكسير في المفاعل. كما تستهلك الوحدة كمية كبيرة من الطاقة للتغلب على فرق الضغط عبر المفاعل الذي ينتج عن تجمع الرواسب على سطح المحفز، وعلى الأجزاء الداخلية للمفاعل، وبالتالي يرتفع استهلاك الطاقة اللازمة لرفع ضغط السوائل المارة عبر المفاعل. يبين الشكل 14-2 مخطط سير عملية التكسير الهيدروجيني.

الشكل (14-2): مخطط سير عملية التكسير الهيدروجيني



المصدر: Akhtar, M., et al., 2024

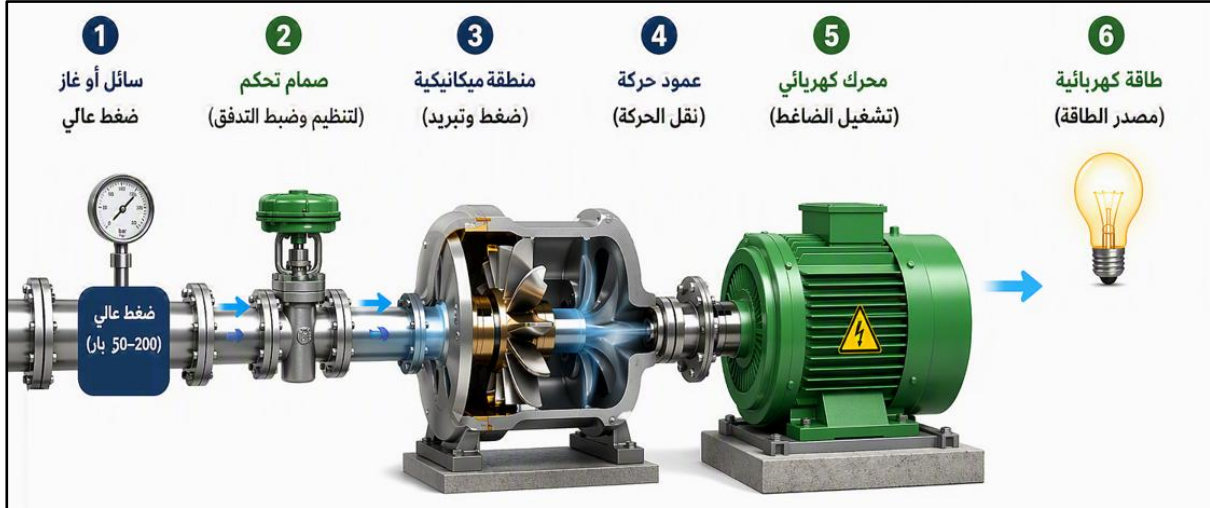
• تحسين التكامل الحراري

بما أن تفاعلات التكسير ناشرة للحرارة Exothermic فيمكن الاستفادة منها في تسخين اللقيم بواسطة المبادلات الحرارية لتخفيض الحمل على الفرن الذي يستهلك كمية كبيرة من الوقود. وقد أكدت التجارب العملية أن تحسين التكامل الحراري يمكن أن يخفف استهلاك الطاقة في الوحدة بنحو 30-50%، وذلك من خلال إضافة مبادلات حرارية أو توسيع سطح التبادل الحراري للمبادلات القائمة في الوحدة.

• استخدام عنفات استرجاع الطاقة الهيدروليكية

يمكن استرجاع الطاقة الكامنة في بعض الخطوط العالية الضغط باستخدام عنفات تستخدم لتدوير معدات ميكانيكية بقوة تمدد السوائل من الضغط العالي إلى الضغط المنخفض، وتوصل هذه المعدات بمولد للطاقة الكهربائية. وتعتبر هذه الطريقة مجدية اقتصادياً في وحدة التكسير الهيدروجيني نظراً لعمل الوحدة تحت ضغط عال. يبين الشكل 15-2 استرجاع الطاقة الهيدروليكية من الخطوط عالية الضغط.

الشكل (2-15): استرجاع الطاقة الهيدروليكية من الخطوط عالية الضغط

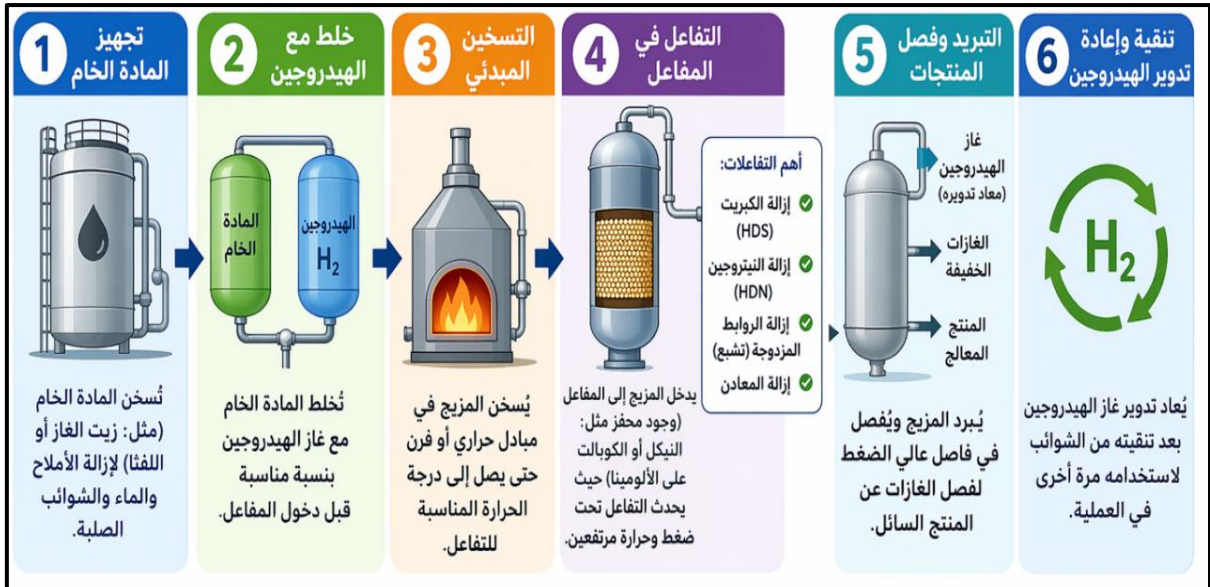


المصدر: Ipieca, 2023

5-2: عملية المعالجة الهيدروجينية Hydrotreating

تعتمد عملية المعالجة الهيدروجينية على مبدأ نزع الكبريت من المشتقات البترولية باستخدام الهيدروجين بوجود محفز Catalyst داخل مفاعل الهدرجة. يبين الشكل 2-16 سير عملية المعالجة الهيدروجينية للمقطرات الوسطى.

الشكل (2-16): سير عملية المعالجة الهيدروجينية للمقطرات الوسطى



المصدر: Hearn, A., et al., 2023

تعود معظم أسباب ضعف كفاءة الطاقة في عملية المعالجة الهيدروجينية إلى نقص التكامل الحراري الذي يؤدي إلى ضياع كمية كبيرة من الحرارة عبر المبردات المائية والمراوح الهوائية بدلاً من الاستفادة منها في تسخين اللقيم الداخل إلى الوحدة. ولتحسين كفاءة الطاقة تتبع الإجراءات التالية:

• تعديل تصميم المفاعل

يمكن تعديل تصميم المفاعل لتنظيم توزيع السوائل عبر السرير الحامل للمحفز، بحيث تزداد سطوح التماس بين المادة البترولية والمحفز، مما يساهم في رفع كفاءة نزع الكبريت واستهلاك أقل للطاقة والهيدروجين.

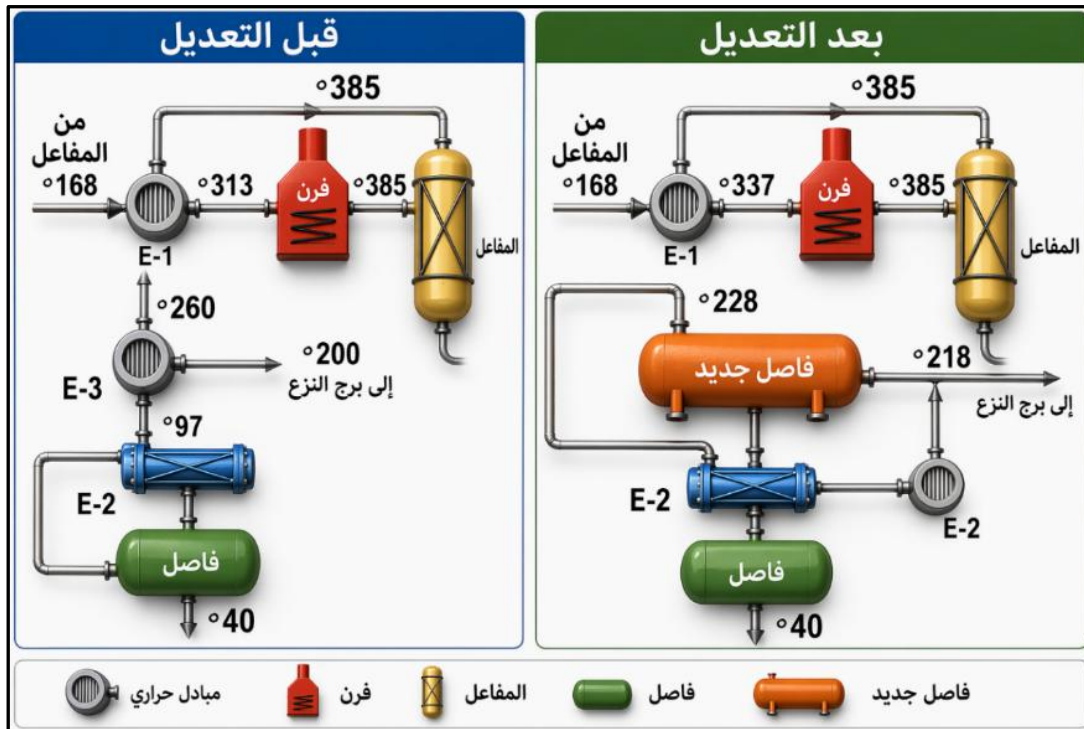
• زيادة مساحة سطح التبادل الحراري

إن تعديل حجم ومساحة سطح التبادل الحراري في المبادلات الحرارية الأولية، لرفع درجة حرارة اللقيم قبل دخوله إلى الفرن، يساعد على توفير استهلاك الوقود في الفرن.

• تركيب وعاء لفصل السائل من الغاز الخارج من المفاعل

يمكن إضافة وعاء لفصل السائل من الغاز الخارج من المفاعل قبل دخوله إلى المبردات الهوائية، وذلك للاستفادة من حرارة السائل الساخن (172°C) في تسخين لقيم برج النزع، وبالتالي تخفيض كمية السائل الساخن الداخل إلى المبردات الهوائية، مما يساعد على تخفيف استهلاك الطاقة الكهربائية في هذه المبردات. كما يساهم التعديل في خفض استهلاك الوقود في فرن تسخين اللقيم الداخل إلى المفاعل من خلال الاستفادة من المبادل في رفع درجة حرارة اللقيم قبل دخوله إلى الفرن. **الشكل 17-2** مقارنة بين مسار الخارج من المفاعل قبل وبعد تركيب فاصل جديد.

الشكل (17-2): مقارنة بين مسار الخارج من المفاعل قبل وبعد إضافة فاصل جديد



على الرغم من المردود الحراري الكبير الذي يمكن الحصول عليه من هذا الخيار إلا أن له بعض السلبيات، أهمها الانعكاس السلبي على عمر المحفز، وتقصير الفترة الزمنية الفاصلة بين عمليتي التنشيط Cycle Length، وذلك بسبب انخفاض نقاوة الهيدروجين الناتج عن زيادة نسبة الغازات المنطلقة من أعلى الفاصل الجديد الساخن إلى شبكة الوقود الغازي. (Hearn, A., et al., 2023)

• تركيب منظومة أجهزة تحكم متطورة

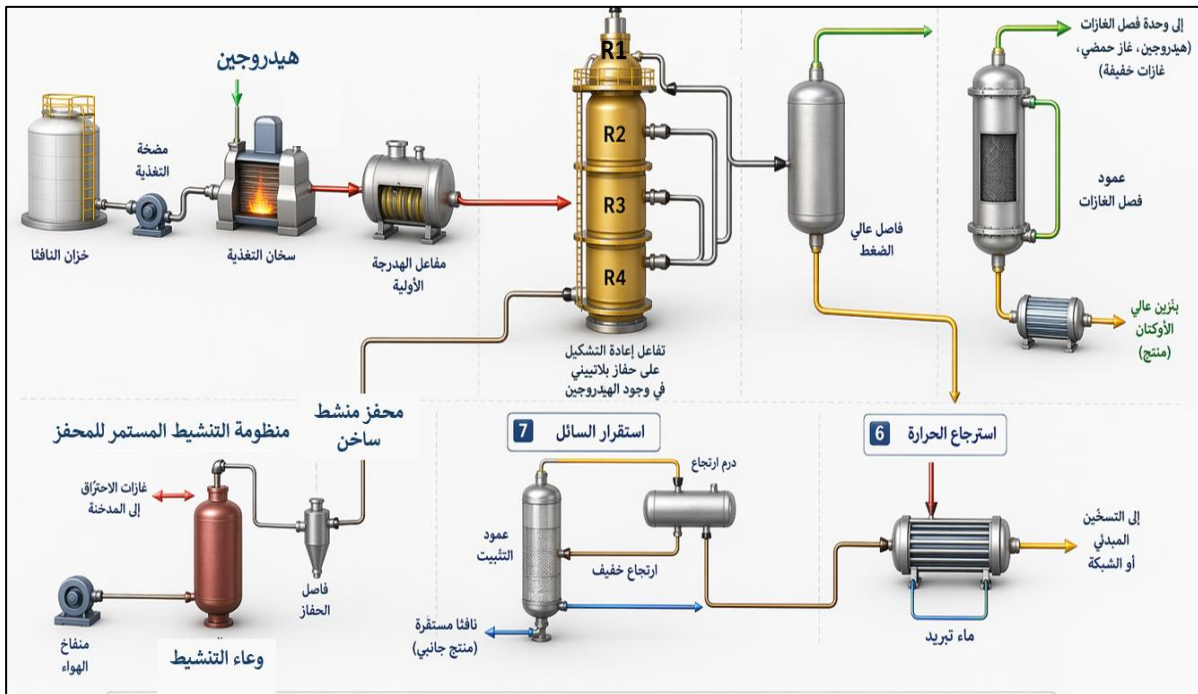
تلعب أجهزة التحكم دوراً مهماً في ضبط ظروف التشغيل عند القيم التي تضمن استهلاك الطاقة ضمن الحدود الدنيا، فعلى سبيل المثال، أظهرت نتائج تركيب منظومة تحكم متطورة في وحدة معالجة هيدروجينية في مصفاة SASOL بجنوب أفريقيا، تحسناً كبيراً في خفض استهلاك الهيدروجين بمعدل 12%، علاوة على تحسين كفاءة الطاقة في الوحدة من خلال خفض معدل استهلاك الوقود في الفرن، وتراجع كمية الغازات المرحلة إلى الشعلة، وكان زمن استرداد رأس مال المشروع شهرين فقط.

2-6: عملية التهذيب الحفزي Catalytic reforming

تهدف عملية التهذيب الحفزي إلى رفع الرقم الأوكتاني للنافثا. وينتج عن تفاعلات التهذيب منتج جانبي ذو أهمية بالغة للمصفاة هو الهيدروجين، يستهلك جزء منه في معالجة النافثا قبل إدخالها إلى المفاعل لتخليصها من الكبريت والمعادن، والجزء الأكبر يحول إلى الشبكة العامة في المصفاة.

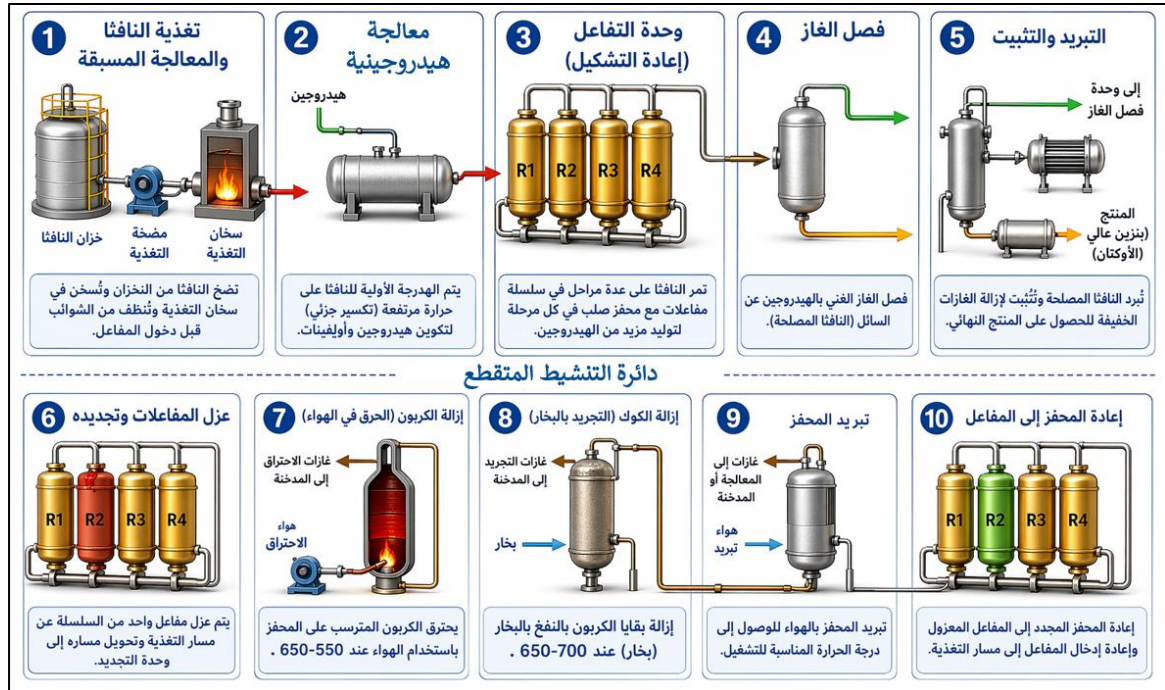
تصنف عملية التهذيب الحفزي تبعاً لطريقة تنشيط المحفز، فهي إما تنشيط مستمر Continuous Catalytic Reforming، حيث يؤخذ جزء من المحفز من المفاعل من التفاعلات ويتم تنشيطه أثناء وجود الوحدة في دائرة العمل. أما طريقة التنشيط المتقطع Semi-regenerative فيتم فيها توقيف الوحدة بالكامل لتنشيط المحفز خلال فترات متقطعة تتراوح بين ستة أشهر إلى سنتين. يبين الشكل 2-18 مخطط عملية التهذيب الحفزي بطريقة التنشيط المستمر. كما يبين الشكل 2-19 مخطط عملية التهذيب الحفزي بالتنشيط المتقطع.

الشكل (2-18): مخطط عملية التهذيب الحفزي بطريقة التنشيط المستمر



المصدر: Garieva F.R., Khasanov K.F., Akhmerov D.R. 2025

الشكل (2-19): مخطط عملية التهذيب الحفزي بالتنشيط المتقطع



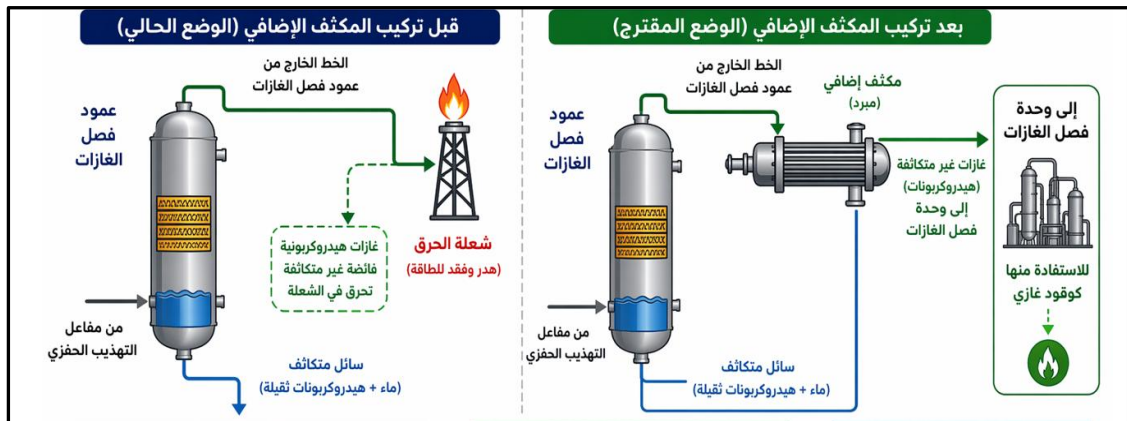
المصدر: Garieva F.R., Khasanov K.F., Akhmerov D.R. 2025

يمكن تحسين كفاءة فصل منتجات وحدة تهذيب النافثا بالمحفز والكشف عن الأماكن التي يتم فيها هدر الطاقة وإجراء بعض التعديلات التصحيحية التالية:

• تركيب مكثف إضافي للخارج من عمود فصل الغازات

يساعد تركيب مكثف إضافي للخارج من عمود فصل الغازات في وحدة التهذيب الحفزي في خفض هدر الغازات الهيدروكربونية الفائضة غير المتكاثفة، وترحيلها إلى وحدة فصل الغازات للاستفادة منها كوقود بدلاً من حرقها في الشعلة. يبين الشكل 2-20 تركيب مكثف إضافي على الخط الخارج من عمود فصل الغازات في وحدة التهذيب الحفزي.

الشكل (2-20): تركيب مكثف إضافي على الخط الخارج من عمود فصل الغازات في وحدة التهذيب الحفزي



المصدر: Garieva F.R., Khasanov K.F., Akhmerov D.R. 2025

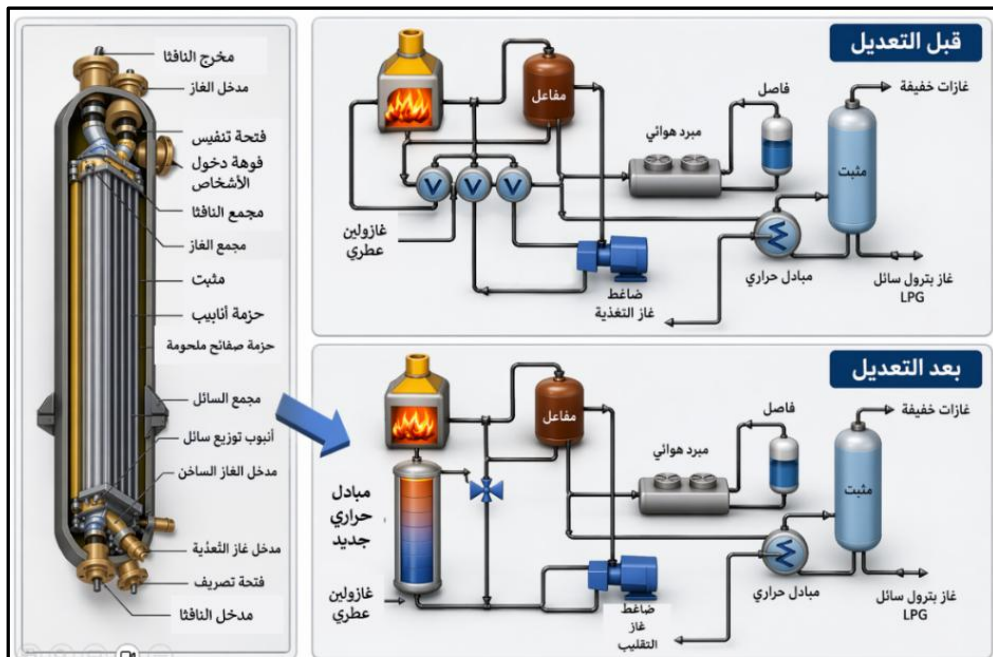
فعلى سبيل المثال، لوحظ في إحدى المصافي الأمريكية حدوث ارتفاع في نسبة إنتاج الغازات الفائضة التي تحول إلى شبكة الوقود الغازي على حساب كمية غاز البترول المسال LPG المنتجة من وعاء

الفصل، حيث أظهرت نتائج التحليل أن سبب المشكلة يعود إلى ارتفاع درجة حرارة الراجع إلى أعلى العمود، وبإجراء التعديل المناسب على المبادلات الحرارية أمكن حل المشكلة، وتحسين مردود الفصل في عمود التقطير، مما أدى إلى زيادة كمية غاز البترول المسال المنتج بمقدار 65000 برميل في السنة، فضلاً عن رفع كفاءة الطاقة في الوحدة، وذلك من خلال الإجراءات التالية:

- تركيب صواني متطورة في عمود فصل المنتجات تتميز بكفاءة فصل عالية.
- تحسين العزل الحراري لجدران الفرن، وتركيب مسخن أولي لهواء الاحتراق الداخل إلى الفرن، وتعديل نظام التحكم بهواء الاحتراق لضبط نسبة الأكسجين بالقيمة التي تضمن كفاءة حرق الوقود.
- الحد ما أمكن من استقبال لقيم من الخزانات واستبدالها بليقيم ساخن من خلال خط مباشر للناثا المنتجة من الوحدات قبل ترحيلها إلى الخزانات، وبالتالي يمكن توفير الوقود اللازم في الفرن لرفع درجة حرارة اللقيم قبل دخوله إلى المفاعل.
- استخدام مبادل حراري متطور يحتوي على صفائح مصنوعة من خلاط معدنية عالية الجودة، يمكن أن يساهم في رفع طاقة التبادل الحراري بين اللقيم والخارج من المفاعل إلى الحد الذي يسمح بالاستغناء عن فرن تسخين اللقيم أثناء فترة عمل الوحدة المنتظم، وبالتالي توفير كمية كبيرة من الطاقة. (Garieva F.R., Khasanov K.F., Akhmerov D.R 2025)

وفي إحدى المصافي الفرنسية قامت شركة "توتال"، بتركيب مبادل من نوع الصفائح الملحومة في وحدة التهذيب الحفزي في مصفاة نورماندي-فرنسا، وذلك في إطار برنامج تحسين كفاءة الطاقة في المصافي التي تملكها، والتي يمثل استهلاك الطاقة فيها حوالي 50% من إجمالي استهلاك الطاقة في مجموعة المنشآت البترولية التي تملكها الشركة، أو ما يعادل 8 مليون طن نفط مكافئ في السنة. وهذا ما يجعل مشروع تحسين كفاءة الطاقة في المصافي التابعة لهذه الشركة في مقدمة اهتمام الإدارة. **الشكل 2-21** مخطط وحدة التهذيب قبل وبعد إضافة مبادل حراري متطور نورماندي.

الشكل (2-21): مخطط وحدة التهذيب قبل وبعد إضافة مبادل حراري متطور في مصفاة نورماندي



المصدر: Coppin, D., et al., 2011

7-2: الوحدات المساندة

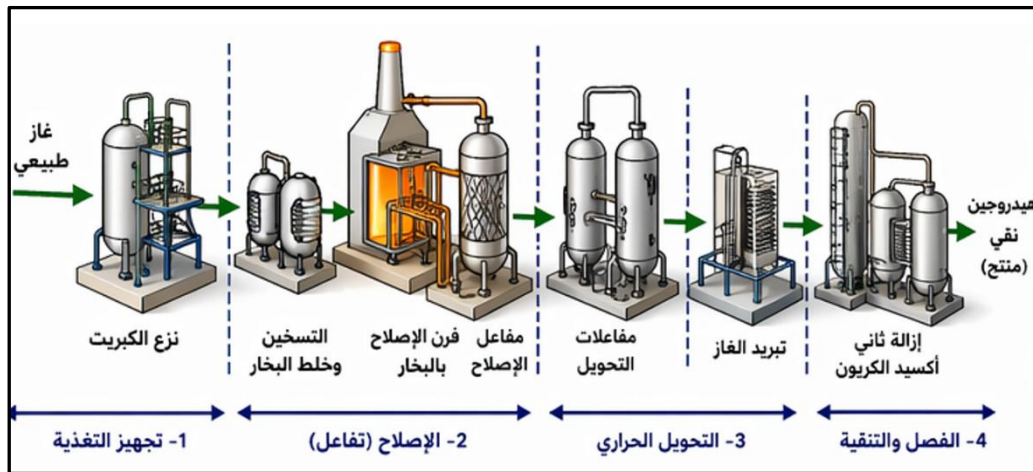
تحتوي مصافي تكرير النفط على عمليات مساندة توفر مواد وخدمات ضرورية لاستمرار عمليات الإنتاج، وتستهلك جزءاً هاماً من الطاقة بكافة أشكالها يمكن أن يصل إلى أكثر من 50% من إجمالي الطاقة المستهلكة. وتتكون من شبكات وقود الأفران، ومولدات البخار والطاقة الكهربائية، وشبكات إنتاج وتوزيع الهيدروجين، ومنظومة الشعلة، وخزانات النفط الخام والمنتجات النفطية.

وفيما يلي أهم الإجراءات التي يمكن تنفيذها لتحسين كفاءة الطاقة في هذه الوحدات:

1-7-2: منظومة إنتاج الهيدروجين

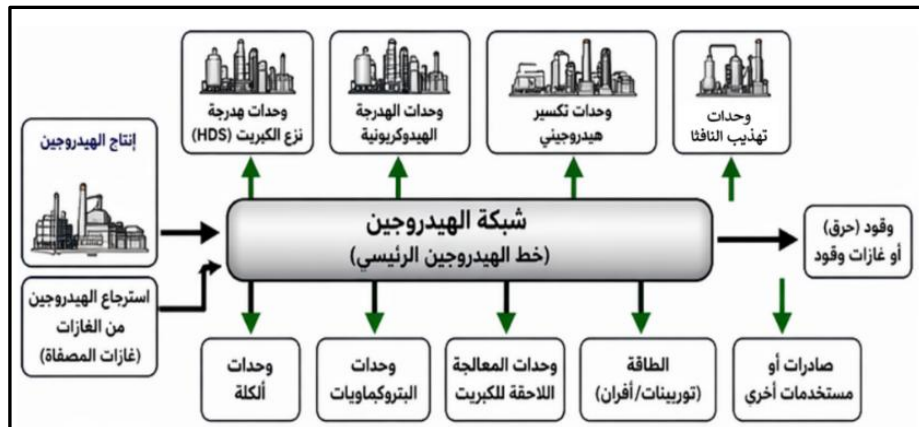
تستهلك مصافي النفط كمية كبيرة من الهيدروجين اللازم لعمليات المعالجة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني. وتحصل عليه من وحدة التهذيب الحفزي كمنتج جانبي من تفاعلات إعادة تشكيل جزيئات النافثا لرفع الرقم الأوكتاني، إلا أن كمية الهيدروجين المنتج من هذه العملية في معظم الحالات لا يكفي لتلبية حاجة وحدات المصفاة، ويتم تعويض النقص من وحدات إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري Steam Reforming. يبين الشكل 22-2 مخطط عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري. ويبين الشكل 23-2 مخطط توزيع الهيدروجين في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (22-2): عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري



المصدر: Huang, L., et al., 2025

الشكل (23-2): مخطط توزيع الهيدروجين في مصفاة تكرير النفط



المصدر: Hightech Energy, 2026

يمكن خفض استهلاك الطاقة اللازمة لإنتاج الهيدروجين في مصافي النفط من خلال استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة الفائضة، أو تركيب وحدة تهذيب أولية قبل وحدة التهذيب البخاري، أو إنشاء وحدة تغويز لتحويل المنتجات الثانوية الرخيصة إلى غاز اصطناعي Syngas الذي يحتوي على كمية كبيرة من الهيدروجين. (Hightech Energy, 2026)

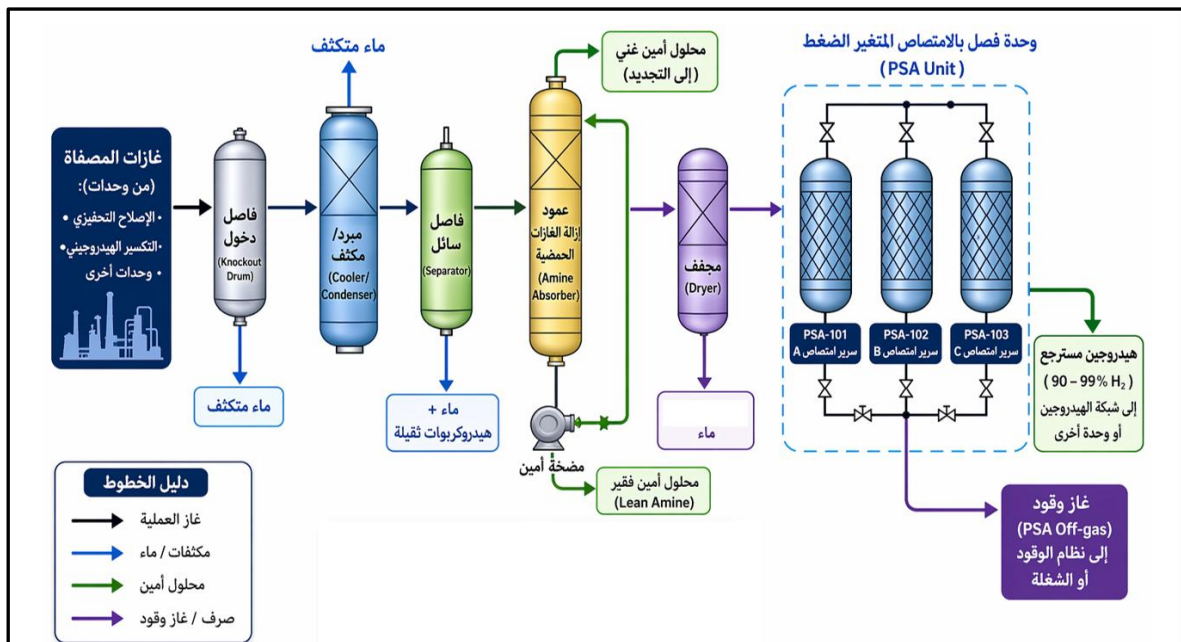
• استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة الفائضة

تحتوي الخطوط الواردة إلى شبكة الوقود الغازي المكونة من غازات المصفاة الفائضة Refinery off-gases على نسب متفاوتة من الهيدروجين قد تصل إلى أعلى من 50%. تتأثر نسبة الهيدروجين في شبكة الوقود الغازي بالعديد من العوامل، منها: (SHI, X., et al., 2024)

- رفع شدة ظروف تشغيل وحدة التهذيب بالمحفز الذي تلجأ إليه المصافي لرفع الرقم الأوكتاني للغازولين، وهذا ينتج عنه تعزيز تفاعلات التكسير التي ينتج عنها زيادة في كمية الغازات الهيدروكربونية المنتجة فضلاً عن ارتفاع نسبة الهيدروجين.
- رفع شدة ظروف تشغيل عملية التكسير الحفزي المائع FCC للحصول على نافثا لقيم لوحدة التهذيب ذات رقم أوكتاني أعلى.
- ضعف كفاءة مكثفات منتج أعلى عمود الفصل في عمليات التقطير، مما ينتج عنه تسرب الغازات غير المتكاثفة إلى شبكة الوقود الغازي.

قد تلجأ المصافي إلى استرجاع الهيدروجين ذي القيمة المرتفعة من خطوط غازات المصفاة بدلاً من تحويله إلى شبكة الوقود الغازي الذي يحرق كوقود في الأفران. وتتنف تقنيات استرجاع الهيدروجين من خطوط غاز المصفاة الغنية بالهيدروجين إلى ثلاث تقنيات رئيسية، الأولى طريقة الامتزاز بأوعية الضغط المتأرجح PSA، والثانية طريقة الامتصاص بالأغشية Membrane، والثالثة طريقة الفصل بالتبريد العميق Cryogenic units. **الشكل 2-14** عملية استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة.

الشكل (2-24): عملية استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة



المصدر: SHI, X., et al., 2024

• إنشاء وحدة تغويز

تعتبر عملية التغويز إحدى الفرص الهامة لتحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط وتعزيز قدرتها على الحصول على مصدر رخيص الثمن للهيدروجين والوقود الغازي اللازم لتشغيل مولدات الطاقة الكهربائية، والتخلص من تكاليف إنشاء وحدة إنتاج هيدروجين، أو استيراد الهيدروجين من مصادر خارجية، وذلك من خلال تحويل المنتجات الثانوية الرخيصة الثمن، كالفحم البترولي والبيتومين والغازات الفائضة في المصفاة إلى غاز اصطناعي يحتوي على نسبة عالية من الهيدروجين. **الشكل 2-25** سير عملية تحويل مخلفات عمليات التكرير إلى هيدروجين ووقود غازي.

الشكل (2-25): عملية تحويل مخلفات عمليات التكرير إلى هيدروجين ووقود غازي



المصدر: Variny, M., et al., 2024

2-7-2: أفران العمليات

تستهلك أفران عمليات التكرير والغلايات Reboilers ما يزيد عن 60% من إجمالي الوقود المستهلك في مصفاة النفط. وتقدر الكفاءة الحرارية للأفران ضمن المجال 75-90% وذلك بتأثير الفقد الحراري. وتفيد الأبحاث المتخصصة بأنه يمكن تحسين كفاءة الأفران من خلال تعديل تصميمها، واستخدام حراقات متطورة ذات كفاءة عالية، تعتمد على مبدأ تحسين كفاءة المزج بين الوقود وهواء الاحتراق، وتعديل منظومة التحكم بشبكة الوقود وكمية الهواء الداخل إلى الحراقات.

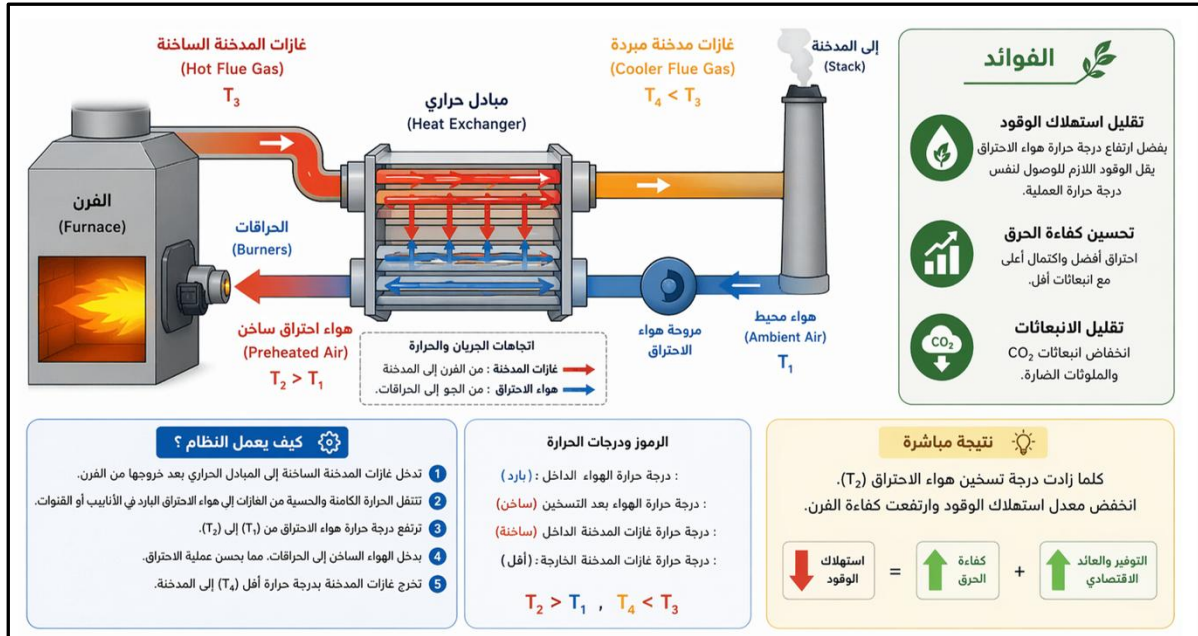
• استعمال أجهزة تحليل موثوقة لغازات مدخنة الفرن

تساعد أجهزة التحليل الموثوقة لغازات المدخنة في التأكد من تحديد النسبة المثالية لهواء الاحتراق، والتي تتم عندها الاستفادة المثلى من كمية الوقود المستهلك، ومنع الهدر الذي يمكن أن ينتج عن بقاء المواد الهيدروكربونية غير المحترقة في غازات المدخنة.

• استرجاع حرارة غازات المدخنة

يمكن الاستفادة من حرارة غازات المدخنة بتركيب مبادل حراري لنقل الحرارة الكامنة في هذه الغازات إلى الهواء الداخل إلى الحراقات Burners لرفع درجة حرارته، وبالتالي خفض استهلاك الوقود وتحسين كفاءة الحرق. يبين الشكل 2-26 الاستفادة من حرارة المدخنة في تسخين هواء الاحتراق.

الشكل (2-26): الاستفادة من حرارة المدخنة في تسخين هواء الاحتراق

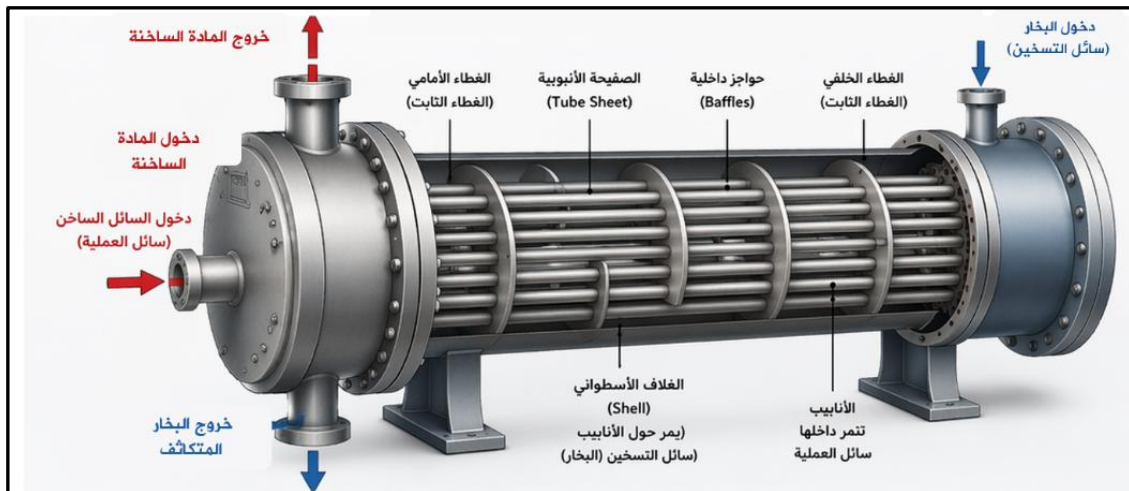


المصدر: Emch, L., 2025

2-7-3: المبادلات الحرارية

تستخدم المبادلات الحرارية لنقل الطاقة الحرارية بين سائلين. وفي مصافي تكرير النفط غالباً ما يستخدم البخار كمصدر حراري للتسخين، إضافة إلى المنتجات السائلة الأخرى. وللمبادلات الحرارية أشكال عديدة منها الأنبوبي أو الصندوقي إلا أن أكثرها استخداماً في صناعة تكرير النفط هو النوع الأنبوبي. يبين الشكل 2-27 نموذجاً لمبادل حراري أنبوبي.

الشكل (2-27): مبادل حراري أنبوبي



المصدر: DLSS, 2025

تكتسب المبادلات الحرارية أهمية كبيرة في برامج تحسين كفاءة الطاقة في صناعة التكرير نظراً للدور الذي تقوم به في الاستفادة من الحرارة الضائعة في توفير استهلاك الطاقة، وفيما يلي أهم إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في المبادلات الحرارية.

• معالجة مشكلة الانسداد

تعتبر ظاهرة الانسداد Fouling إحدى أهم المشكلات التي تؤدي إلى تخفيض كفاءة انتقال الطاقة في المبادلات الحرارية، نتيجة توضع الرواسب على سطوح أنابيب المبادل مما يعيق انتقال الحرارة بين المادتين الساخنة والباردة، وتؤدي إلى خسائر باهظة، وتزداد هذه الخسائر بتأثير عوامل عديدة، منها ما يعود إلى نوعية النفط الخام المكرر ونسبة الشوائب الموجودة فيه، ومنها ما يعود إلى أخطاء في تصميم المبادل الحراري، أو اضطراب في ظروف تشغيل الوحدات الإنتاجية. يبين الشكل 2-28 حزمة أنابيب مبادل حراري قبل وبعد توضع الرواسب.

الشكل (2-28): حزمة أنابيب مبادل حراري قبل وبعد توضع الرواسب



المصدر: (DLSS, 2025)

تعتمد الوقاية من الترسبات في المبادلات الحرارية على الحفاظ على نظافة الأسطح واستقرار تدفق السوائل لمنع تكون الرواسب أو التصاقها، وذلك من خلال الإجراءات التالية: (DLSS, 2025)

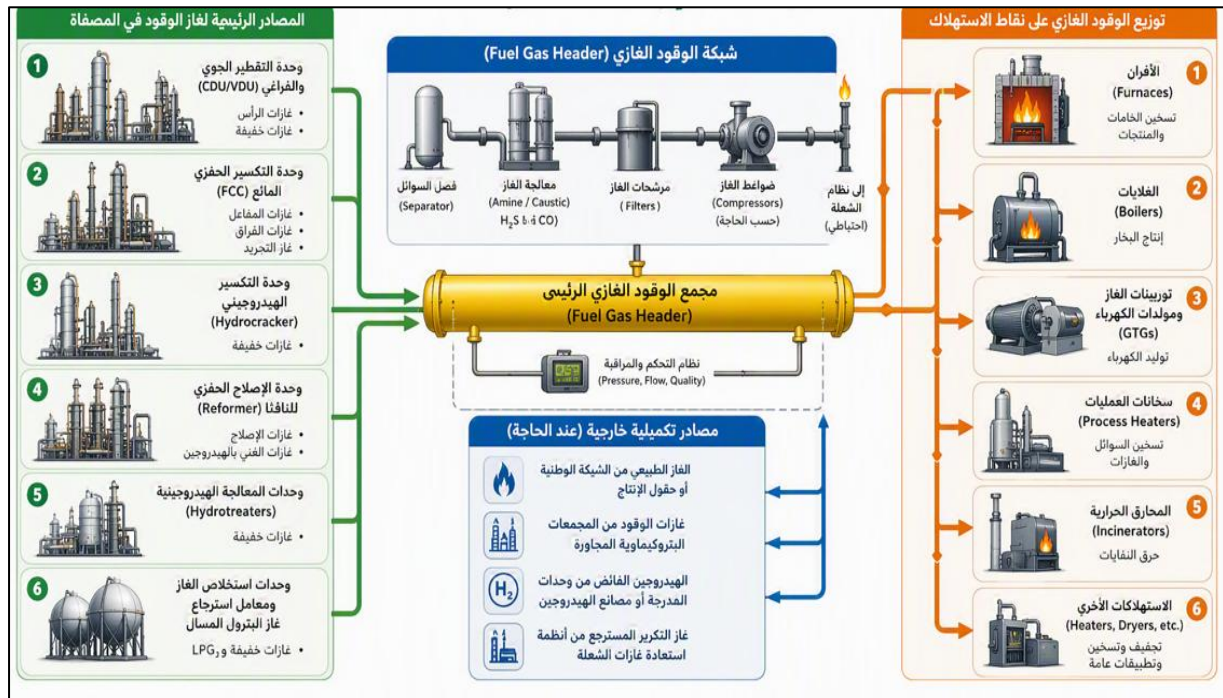
- تحسين التصميم، وذلك باختيار أنابيب ذات سطوح ملساء (مثل الفولاذ المقاوم للصدأ أو التيتانيوم) مقاومة للتآكل والترسبات، والتأكد من سرعة تدفق عالية للسائل لتقليل المناطق الراكدة التي تترسب فيها الجزيئات الصلبة، واستخدام حواجز للحفاظ على تدفق مضطرب ومنع المناطق الميتة.
- المعالجة الكيميائية، بإضافة مواد مانعة للترسبات أو مبيدات حيوية للسيطرة على نمو الميكروبات التي تولد الرواسب، مع المحافظة على التركيب الكيميائي للماء لتقليل ترسب الأملاح والمعادن.
- التحكم بظروف التشغيل، بالمراقبة المستمرة ومنع انخفاض الضغط ومعدلات التدفق للكشف المبكر عن التراكمات، مع المحافظة على درجات حرارة معتدلة، حيث أن الحرارة الشديدة تسرع توضع الرواسب.
- إجراء عمليات تنظيف دورية قبل أن يتفاقم حجم الترسبات.

- إجراء صيانة وقائية، باستخدام الترشيح أو المعالجة المسبقة للمياه الداخلة إلى المبادل لإزالة الجزيئات العالقة، وتطبيق طبقات طلاء تقلل من التصاق الرواسب العضوية أو المعدنية على سطوح المبادل الحراري.

2-7-4: شبكة الوقود الغازي

يمثل الوقود الغازي المنتج من عمليات التكرير أحد مصادر الطاقة المستهلكة في المصفاة، وتختلف كميتها تبعاً لعدة عوامل، منها نوع عمليات التكرير الموجودة في المصفاة. كما تزداد كمية الوقود الغازي المنتج من هذه العمليات نتيجة رفع شدة ظروف التشغيل للحصول على رقم أوكتان أعلى للغازولين المنتج. وفي حال عدم كفاية غاز المصفاة لتلبية حاجتها من الوقود يتم تعويض النقص من خلال استيراد الغاز الطبيعي من حقول الإنتاج أو من وحدات صناعة البتروكيماويات المجاورة، أو الهيدروجين الفائض عن عمليات الهدرجة. يبين الشكل 29-2 شبكة الوقود الغازي في المصفاة

الشكل (29-2): شبكة الوقود الغازي في المصفاة



يعتبر الوقود الغاز المنتج من مختلف وحدات التكرير أحد أهم مصادر الطاقة المستخدمة داخل المصفاة، حيث يُستغل بصورة رئيسية كوقود في الأفران، والغلايات، ووحدات توليد الطاقة والبخار. وتختلف كمية الغاز المتولدة باختلاف نوعية النفط الخام المكرر، وتكوين المصفاة، ونوعية العمليات التكريرية المتاحة فيها، خاصة الوحدات التحويلية مثل التكسير الحفزي المائع (FCC)، والتكسير الهيدروجيني (Hydrocracking)، والإصلاح الحفزي (Catalytic Reforming).

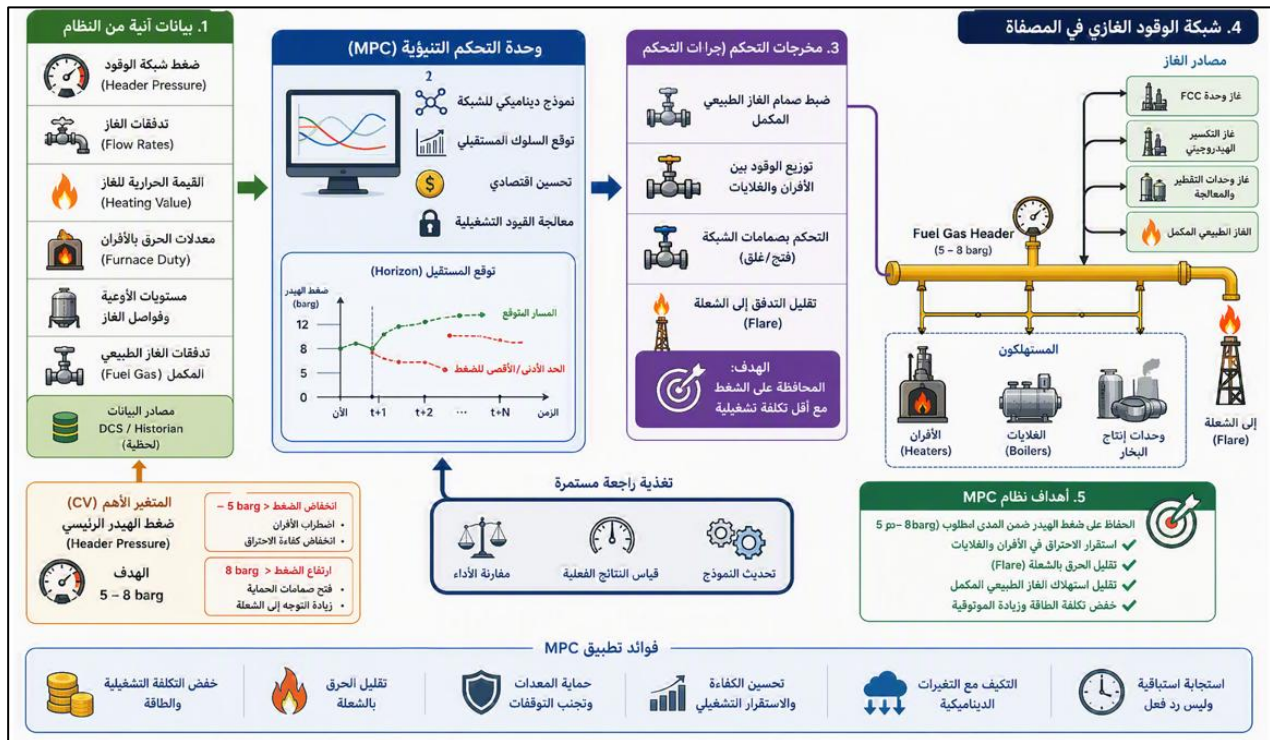
كما تزداد كميات الوقود الغازي المنتجة مع زيادة شدة ظروف التشغيل في بعض الوحدات التكريرية، ولا سيما وحدات الإصلاح الحفزي، بهدف رفع رقم الأوكتان للغازولين المنتج، حيث تؤدي درجات الحرارة والضغط الأعلى إلى زيادة إنتاج الغازات الخفيفة والهيدروجين. وتقوم شبكة الوقود الغازي للمصفاة بجمع هذه الغازات من مختلف الوحدات الإنتاجية، ثم معالجتها وتوزيعها على نقاط الاستهلاك المختلفة وفقاً لمتطلبات التشغيل.

في الحالات التي لا تكفي فيها كميات غاز المصفاة المنتجة ذاتياً لتغطية احتياجات الطاقة، يتم تعويض العجز من خلال استيراد الغاز الطبيعي من حقول الإنتاج المجاورة أو من شبكات الغاز الوطنية، كما يمكن الاستفادة من غازات الوقود الواردة من مجمعات البتروكيماويات القريبة أو من الهيدروجين الفائض الناتج عن بعض عمليات الهدرجة والمعالجة الهيدروجينية. ويؤدي التكامل بين مصادر الوقود المختلفة إلى تعزيز موثوقية إمدادات الطاقة وتحسين كفاءة تشغيل المصفاة وتقليل تكاليف التشغيل.

تواجه شبكة الوقود الغازي عدة تحديات تشغيلية منها، تغير معدلات إنتاج الغاز من عمليات التكرير، واختلاف القيمة الحرارية للغاز، وتقلب معدل استهلاك الأفران والغلايات من الوقود، مع المحافظة على ضغط الموزع الرئيس للشبكة، وتقليل طرح الغازات إلى الشعلة، وتقليل استهلاك الغاز الطبيعي المستورد.

وللتغلب على هذه التحديات تحتاج عملية تحسين كفاءة تشغيل شبكة الوقود الغازي إلى استخدام تقنيات متطورة لتنظيم أداؤها، مثل نظام التحكم التنبؤي Model Predictive Control MPC يعتمد مبدأ عمل نظام التحكم التنبؤي MPC على التنبؤ بالحالة المستقبلية للشبكة باستخدام نموذج رياضي ثم اتخاذ إجراءات تحكم استباقية تحقق أفضل أداء اقتصادي وتشغيلي مع الالتزام بجميع القيود التشغيلية يبين الشكل 2-30 منظومة التحكم بشبكة الوقود الغازي في مصفاة النفط.

الشكل (2-30): منظومة التحكم بشبكة الوقود الغازي في مصفاة النفط



المصدر: Azmi, P., et al., 2024

من أكثر التحديات التي تواجه عملية إعداد موازنة الوقود الغازي للمصفاة هي عدم دقة أجهزة قياس كمية الغاز على خطوط الإنتاج، وعدم توفر أجهزة تحليل مكونات الغاز في هذه الخطوط. ويبين الجدول 1-2 نموذجاً لموازنة شبكة الوقود الغازي في المصفاة التي يجب إجراؤها لتقييم الوضع الراهن

لاستهلاك الطاقة، وبما أن هذه الموازنة تتغير بتغير نوعية النفط الخام المكرر وبتغير فصول السنة فيجب إجراء هذه العملية بشكل دوري وعلى فترات زمنية متقاربة.

الجدول 2-1: نموذج موازنة شبكة الوقود الغازي في المصفاة

الإنتاج	ألف قدم مكعب قياسي/اليوم MSCF/D	القيمة الحرارية وحدة حرارية بريطانية/قدم مكعب قياسي BTU/SCF	مليون وحدة حرارية بريطانية في الساعة MMBTU/h
غاز طبيعي	30835	976	1254
وحدة التكسير الحفزي المائع	914	1,023	39
فصل الغازات	9940	811	336
تقطير جوي	7770	434	141
وحدة الغاز 2	2053	786	67
التكسير الحفزي	27603	971	1117
وحدة تنقية الهيدروجين 1	1880	781	61
وحدة تنقية الهيدروجين 2	2831	434	51
وحدة البنزين	573	781	19
وحدة الإيثيلين	13205	622	342
وحدة تقطير النفط الخام	15	781	0.1
مجموع الإنتاج	97,620	843	3,428
الاستهلاك			
وحدة فصل الغاز	915	781	30
تقطير جوي 1	13972	781	455
تقطير جوي 2	12995	781	423
وحدة الألكلة	3530	781	115
وحدة الغاز 1	1109	781	36
وحدة الغاز 2	396	781	13
المرجل 1	12093	969	488
المرجل 2	18569	747	578
المرجل 3	14326	781	466
التكسير الهيدروجيني	2775	971	112
التفحيم المؤجل	9938	971	402
وحدة إنتاج الهيدروجين	6439	781	210
وحدة البنزين	8	781	0.28
الشعلات	16	781	0.1
مجموع الاستهلاك	97,082	823	3,328
الفرق	538		99
النسبة المئوية للفرق	0.6 %		2.9 %

تشير المعايير الدولية المعتمدة على الخبرات السابقة لمصافي النفط إلى أن الفرق بين كمية كل من الوقود الغازي المنتج والمستهلك (إجمالي الوقود المنتج مضافاً إليه كمية الوقود المستورد من خارج المصفاة مقابل إجمالي كمية الوقود المستهلك) يجب ألا يزيد عن المجال 5-10% على أساس الوحدات الحرارية. وإذا ارتفع الفرق عن هذه القيمة فينصح باتخاذ الإجراءات التالية:

- فحص وإعادة معايرة كافة أجهزة القياس المركبة على خطوط شبكة الوقود الغازي، وخصوصاً تلك التي لم يتم فحصها منذ زمن بعيد.
- التأكد من صحة عملية فحص عينات الغاز

2-7-5: منظومة توليد وتوزيع بخار الماء

تعتبر عملية تحسين كفاءة الطاقة في شبكة بخار الماء من العمليات المعقدة، نظراً لتوزيع خطوط أنابيب بخار الماء في كافة أجزاء المصفاة عبر ثلاث شبكات رئيسية تعمل تحت ضغوط مختلفة، وترتبط بعدد كبير من المنتجين والمستهلكين. فهناك العديد من المعدات المنتجة للبخار والكهرباء، مثل الغلايات البخارية Steam boiler، والعنفات البخارية Steam turbine، والعنفات الغازية Gas turbine موزعة في أماكن متفرقة، أو وحدات التوليد المشترك Cogeneration، أو من استرجاع الحرارة العادمة في الوحدات الإنتاجية. يبين الشكل 2-31 مخطط شبكة توليد وتوزيع بخار الماء في مصافي النفط

تكتسب عملية إعداد موازنة بخار الماء في مصافي النفط أهميتها من أنها تشير إلى أماكن الهدر في خطوط بخار الماء، وتحديد كفاءة الشبكة، وبالتالي إبراز فرص التحسين المحتملة. تساعد التقنيات الحديثة في تسهيل إنجاز العملية في زمن قصير من خلال برامج الكومبيوتر الجاهزة، ويمكن من خلالها حساب كفاءة استخدام الطاقة في حالات مختلفة من نوع الوقود المستخدم، وفي حالات تغير نوع النفط الخام المكرر. وفيما يلي أهم إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في شبكة توليد وتوزيع بخار الماء في مصفاة تكرير النفط.

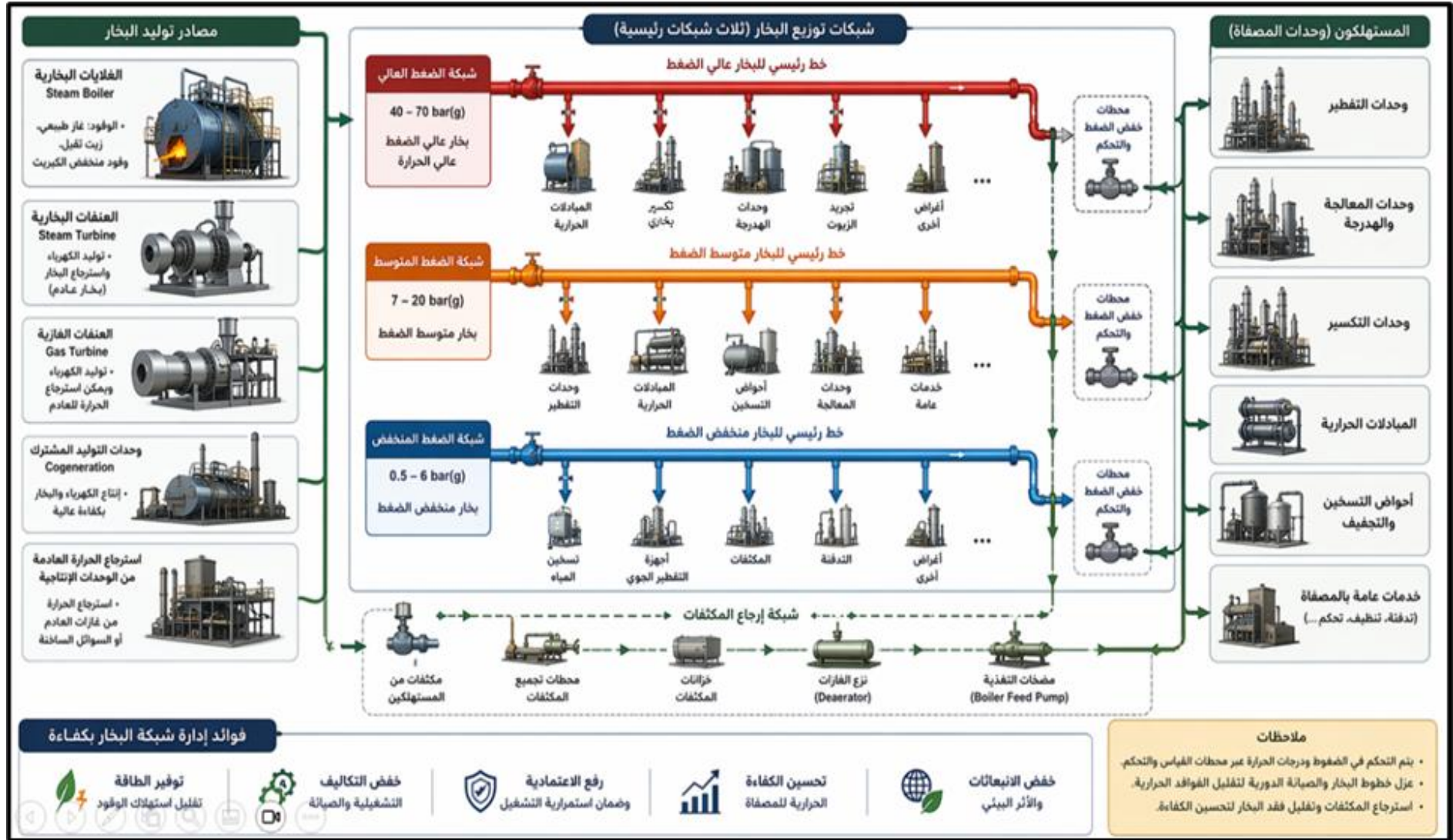
• تحسين معالجة مياه تغذية مولدات بخار الماء

إن ضبط عملية معالجة مياه التغذية المستخدمة في مولدات بخار الماء يساعد على تفادي انسداد أنابيب المولد بالرواسب الملحية التي تعيق وصول الحرارة إلى المياه الجارية عبر الأنابيب. كما أن استخدام المياه النقية يساهم في تخفيض كمية مياه التصريف Blowdown التي تطبق لإزالة الرواسب المتجمعة في أسفل أوعية تجميع المياه الناتجة عن تكاثف البخار.

• استخدام أجهزة متطورة لضبط نسبة الأوكسجين

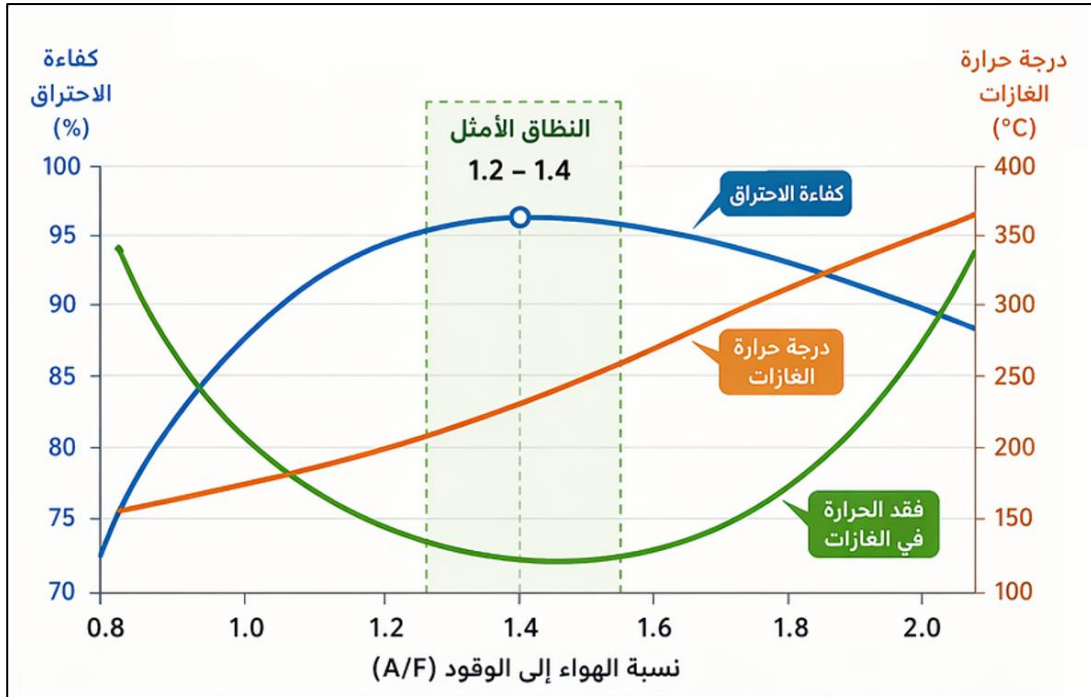
يمكن ضبط نسبة الأوكسجين في غازات مدخنة مولدات بخار الماء باستخدام أجهزة تحكم متطورة تعمل آلياً، بدلاً من الطريقة القديمة التي تعتمد على تعديل فتحة بوابة المدخنة يدوياً. وعلى الرغم من ارتفاع تكلفة هذا التعديل إلا أنه مبرر نظراً للفوائد الكبيرة التي يقدمها، وأهمها تخفيض معدل استهلاك الوقود في الفرن بنسبة 2-4% من إجمالي استهلاك الفرن في ظروف التشغيل العادية. يبين الشكل 2-32 العلاقة بين نسبة الهواء إلى الوقود في تحسين كفاءة الاحتراق في مولدات بخار الماء.

الشكل (2-31): مخطط شبكة توليد وتوزيع بخار الماء في مصافي النفط



المصدر: Sladkovskiy, D., & Murzin, D., 2022

الشكل (2-32): العلاقة بين نسبة الهواء إلى الوقود وكفاءة الحرق في مولد بخار الماء



• الاهتمام ببرامج الصيانة الدورية

تشمل عمليات الصيانة الدورية لمنظومة توليد بخار الماء إجراء اختبارات شاملة للتأكد من أن كافة الأجزاء تعمل بأقصى طاقتها، مع التركيز بشكل خاص على إصلاح مواد العزل الحراري لجدران مولد البخار لمنع تسرب الحرارة إلى الجو، أو دخول الهواء الجوي إلى غرفة الاحتراق.

كما تتضمن برامج الصيانة الدورية عمليات تنظيف الأنابيب من الرواسب الداخلية (جهة الماء)، والخارجية التي تترسب على الأنابيب في غرفة الاحتراق على شكل طبقة كربونية، وتزداد نسبتها كلما كان الوقود المستخدم ثقیلاً كزيت الوقود، أو صلباً كالصمغ، وينخفض إلى أقل معدلاته باستخدام الغاز الطبيعي. وقد أظهرت إحدى الدراسات أن توضع طبقة كربون سماكتها 0.8 ملم تخفض معدل انتقال الحرارة بنسبة 9.5%، أما عندما تصل سماكة الطبقة إلى 4.5 ملم فإن انتقال الحرارة ينخفض بمعدل 69%. (Tawil, E., 2022)

• تحسين العزل الحراري لجدران الأفران والمراجل

بما أن مراحل توليد بخار الماء تعمل على مبدأ حرق الوقود في حراقات بلهب مفتوح داخل غرفة اشتعال تحتوي على أنابيب تمر داخلها المادة المراد تسخينها. وللمحافظة على حرارة اللهب داخل غرفة الاشتعال ومنع تسربها إلى المحيط الخارجي، تستخدم مواد بناء تتميز بدرجة عالية من العزل للحرارة، حيث أن ضعف العزل الحراري يمكن أن يؤدي إلى نقص في الكفاءة الحرارية تصل إلى نحو 1.5%. **الشكل 2-33** العزل الحراري لجدار فرن عمليات التكوير.

الشكل (2-33): العزل الحراري لجدار فرن عمليات التكرير



من أكثر أسباب حدوث الفقد الحراري من جدران الأفران والمراجل البخارية:

- تشغيل الفرن أو المرجل بطاقة أعلى من طاقته التصميمية.
- قصور عمليات الكشف والصيانة أثناء فترة التوقف لإجراء الصيانات الدورية.
- ضعف الالتزام بتطبيق برامج صيانة وتنظيف الحراقات، والذي ينتج عنه تشوه شكل لهب الحراق وانحرافه عن المركز، نتيجة انسداد فوهات الحراقات بالرواسب المرافقة للوقود.
- تسرب الهواء إلى الفرن عبر الثقوب، أو تشققات القرميد مما يؤدي إلى اضطراب نسبة الأوكسجين وقيمة الضغط داخل غرفة الاشتعال. يمكن ضبط كمية غازات المدخنة وتقليلها إلى الحد الأدنى من خلال ترميم التشققات التي تؤدي إلى تسرب الهواء إلى غرفة الاحتراق، وتسبب زيادة استهلاك الوقود. ولمنع تسرب الهواء إلى غرفة الاشتعال كفتحات دخول الأنابيب إلى الفرن يستخدم عازل مرن لسد الفراغات بين الجدار القرميدي والأنبوب الداخل إلى الفرن. يبين الشكل 2-34 نموذج عوازل منع دخول الهواء عبر فوهات دخول الأنابيب إلى الفرن.

الشكل 2-34: نموذج عوازل منع دخول الهواء عبر فوهات دخول الأنابيب إلى الفرن



كما يمكن أن يتسرب الهواء إلى غرفة الاشتعال من فوهات الكشف على لهب الحراقات الموزعة على جسم الفرن، وخصوصاً عندما تترك مفتوحة أو تتعرض لكسر يمنع إغلاقها بشكل محكم.

• استرجاع الحرارة من غازات مدخنة مولد بخار الماء

يمكن استرجاع الحرارة من غازات المدخنة للاستفادة منها في تسخين المياه الداخلة إلى مولد البخار بهدف توفير الوقود المستهلك. وتتم العملية بتمرير الماء المستخدم لإنتاج البخار عبر المدخنة قبل إدخاله إلى المرجل. يبين الشكل 2-35 مخطط استرجاع الحرارة من غازات مدخنة المرجل البخاري.

الشكل (2-35): استرجاع الحرارة من غازات مدخنة المرجل البخاري

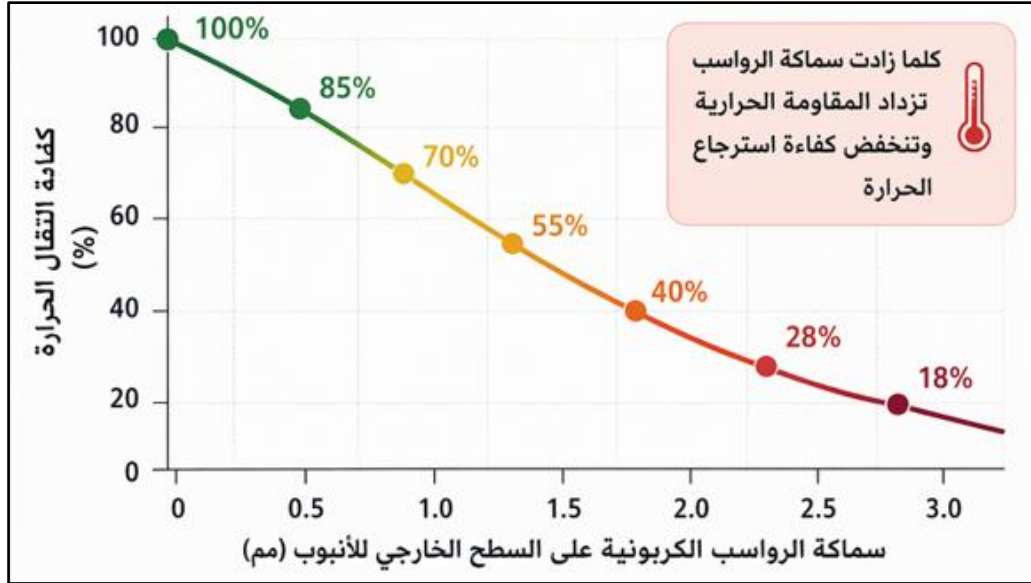


المصدر: Tawil, E., 2022

• تنظيف أنابيب منطقة الحمل

تتوضع الرواسب الكربونية الناتجة عن احتراق الوقود في منطقة الحمل في الأفران والمراجل البخارية فتشكل حاجزاً يمنع انتقال الحرارة عبر الأنابيب التي يتم فيها استرجاع الحرارة من الغازات المنطلقة من المدخنة للاستفادة منها في تسخين المياه الداخلة إلى مولد البخار. وكلما زادت سماكة الرواسب تنخفض كفاءة استرجاع الحرارة الضائعة من منطقة الحمل في مراجل البخار والأفران. يبين الشكل 2-36 العلاقة بين سماكة الرواسب وكفاءة انتقال الحرارة في منطقة حمل المراجل البخارية.

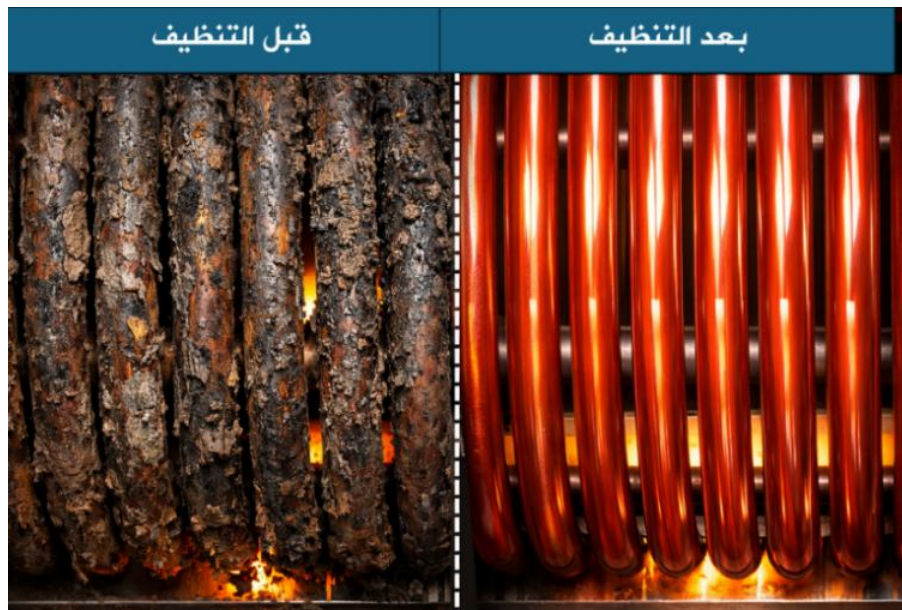
الشكل (2- 36): العلاقة بين سماكة الرواسب وكفاءة انتقال الحرارة في المراحل البخارية



المصدر: Tawil, E., 2022

ولتفادي هذه المشكلة يجب إجراء عمليات تنظيف على فترات زمنية متقطعة أثناء وجود الفرن في دائرة العمل. وتحدد طول الفترة الزمنية بين عمليتي غسيل تبعاً لتغير قيمة فرق ضغط الشفط عبر أنابيب منطقة الحمل في المدخنة، ودرجة حرارة الغازات الخارجة من المدخنة. كما يمكن تنظيف الأنابيب بطرق مختلفة منها طرق التنظيف الميكانيكي التي تستخدم فيها أدوات تنظيف مرنة تتحرك عبر الأنابيب، أو باستخدام الفرش، والمكاشط، أو نفثات الماء عالية الضغط لإزالة الرواسب من أسطح الأنابيب. وهناك طريقة كيميائية يتم فيها تدوير محاليل التنظيف (حمضية أو قلوية) عبر الأنابيب لإذابة القشور ونواتج التآكل. أما الطريقة الثالثة فهي النفخ بالبخار أو الماء أثناء وجود الفرن في العمل. يبين **الشكل 2- 37** أنابيب الأفران والمراحل البخارية قبل وبعد عملية الغسيل.

الشكل (2- 37): أنابيب الأفران والمراحل البخارية قبل وبعد عملية الغسيل



المصدر: Watson., M., 2015

• إعادة استخدام بخار الماء من خطوط تصفية مياه التغذية

تحتوي المياه الخارجة من خطوط تصفية خزان الضغط العالي في مولد البخار على كمية من بخار الماء ذي الجودة المنخفضة الذي يمكن الاستفادة منه في عمليات التسخين المفتوحة، أو تسخين المياه الداخلة إلى المولد. تساهم هذه العملية في توفير ما يعادل 1.3% من كمية الوقود المستهلك.

يلخص الجدول 2-2 أهم إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مولدات بخار الماء، ونسبة توفير الوقود وزمن استرداد التكلفة والفوائد الأخرى التي يمكن الحصول عليها من تطبيق هذه الإجراءات.

الجدول 2-2: إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مولدات بخار الماء

الإجراءات	نسبة توفير الوقود	زمن استرداد الكلفة (سنة)	فوائد أخرى
تحسين أجهزة القياس والتحكم	3%	0.6	تخفيض الانبعاثات
تخفيض كمية غازات المدخنة	2-5%	-	تخفيض الانبعاثات
تخفيض هواء الاحتراق الفائض	1% لكل 15% من الهواء الفائض	-	
تحسين العزل الحراري	6-26%		تقصير زمن الإقلاع
استرجاع حرارة غازات المدخنة	1%	2	
استرجاع بخار ماء التصفية	1.3%	1-2.7	
استخدام الوقود البديل	متغير	-	تخفيض المخلفات الصلبة الناتجة عن الوقود التقليدي

أما أهم إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة في شبكة خطوط توزيع البخار فهي على النحو التالي:

• تحسين العزل الحراري

يمكن تخفيض هدر الطاقة في خطوط أنابيب شبكة توزيع بخار الماء من خلال استخدام مواد عزل متطورة وعالية الجودة، من حيث مقاومتها لامتصاص الماء، وانخفاض ناقليتها الحرارية، ومقاومتها للحريق. كما يجب الاهتمام بجودة تطبيق برامج الصيانة الدورية للتأكد من أن مواد العزل الحراري قد تم إعادتها بشكل صحيح بعد إجراء عمليات صيانة خطوط الشبكة.

• تطبيق برامج الصيانة الدورية على مصائد بخار الماء

تكتسب مصائد بخار الماء Steam trap أهمية خاصة بين مكونات شبكة توزيع بخار الماء نظراً لدورها في رفع كفاءة الطاقة في الشبكة. يتركز دور مصائد بخار الماء في فصل المياه المتكاثفة المرافقة لبخار الماء الجاري في خطوط الشبكة وتوجيهها نحو نظام استرجاع المياه المتكاثفة بهدف المحافظة على سهولة جريان البخار في الخطوط، وبالتالي تخفيف الفاقد الحراري. كما تعتمد جودة أداء عملية الفصل على اختيار أنواع جيدة من مصائد البخار ذات خصائص مقاومة للاهتراء والتآكل. فعند تعطل المصيدة عن أداء عملها تتجمع المياه المتكاثفة في الخط وتتراكم إلى الحد الذي يعيق الجريان فتحدث ظاهرة الطرق Hammer التي ينتج عنها في بعض الحالات تحطم خطوط الشبكة وتسرب كميات كبيرة من بخار الماء إلى الجو. يبين الشكل 2-38 مبدأ عمل مصيدة بخار الماء.

الشكل (2-38): مبدأ عمل مصيدة بخار الماء



المصدر: James, R., 2017

أشارت إحدى الدراسات المتخصصة إلى أن تطبيق برامج مراقبة وصيانة مصائد بخار الماء يؤدي إلى توفير في الطاقة، وهي تقنية حديثة تساعد على كشف خلل وظيفة المصيدة فور حدوثه. وفي إحدى المصافي الأمريكية المتوسطة الحجم تم تحقيق وفر سنوي قدره 147 ألف دولار نتيجة تطبيق مثل هذا البرنامج. (Nippon, 2013)

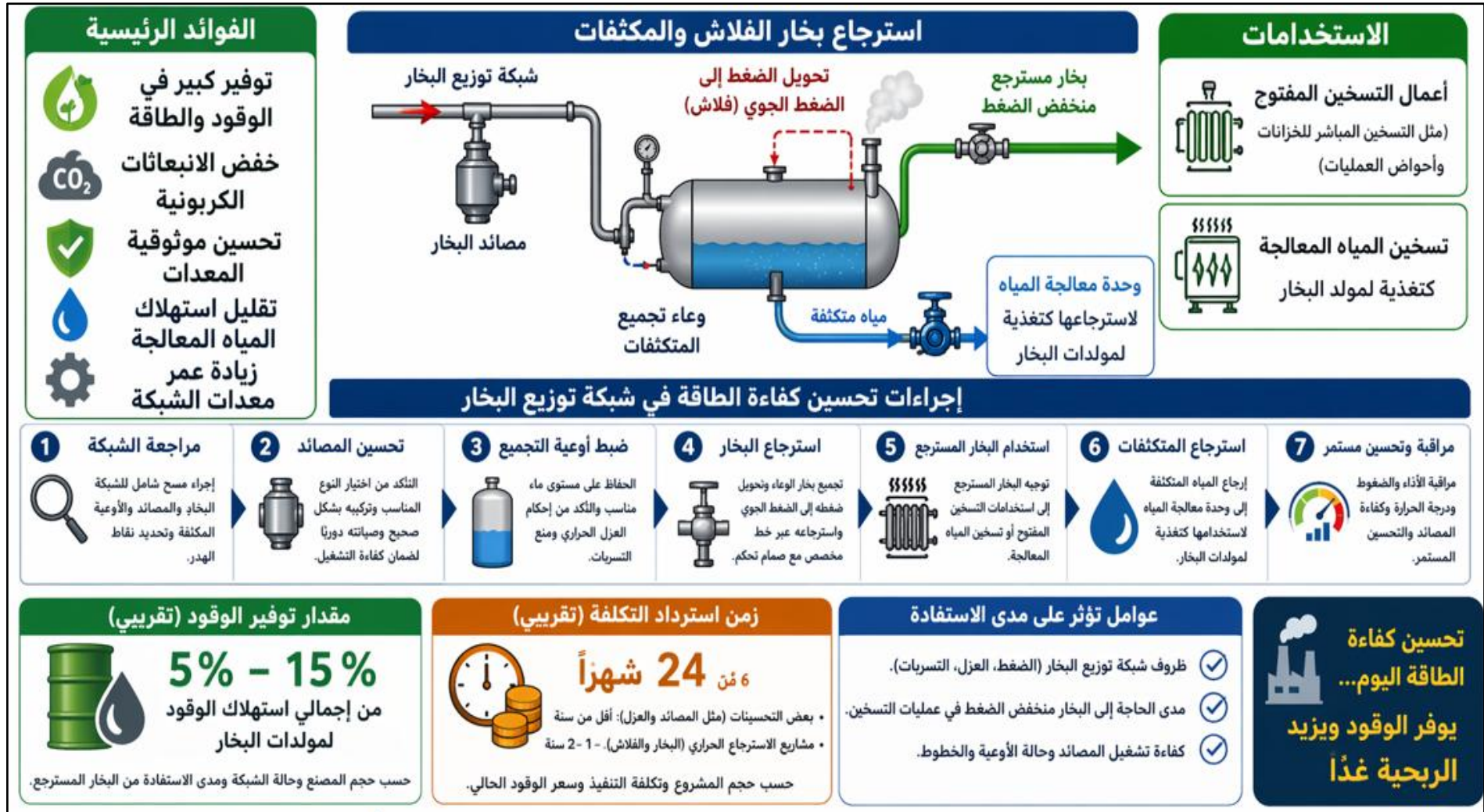
• استرجاع بخار الماء من وعاء تجمع بخار الماء المتكاثف

إن اضطراب ظروف عمل وعاء تجمع بخار الماء المتكاثف الخارج من مصائد البخار يؤدي إلى هدر كبير في الطاقة، لذلك يتوجه الاهتمام نحو ضبط ظروف هذا الوعاء والعمل على استرجاع بخار الماء الناتج عن تحويل الضغط في الوعاء إلى الضغط الجوي والاستفادة منه في أعمال التسخين المفتوح، أو تسخين المياه المعالجة الداخلة كتغذية إلى مولد البخار. ويتوقف مدى الاستفادة من هذه العملية على ظروف شبكة خطوط التوزيع، وعلى مدى الحاجة إلى هذا البخار في عمليات التسخين. كما يجب التأكد من استرجاع المياه المتكاثفة إلى وحدة معالجة المياه للاستفادة منها كتغذية لمولدات البخار. يلخص الشكل 2-39 إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في شبكة توزيع البخار في مصفاة النفط.

قد يواجه تطبيق برنامج تحسين كفاءة شبكة بخار الماء صعوبات في التنفيذ، وذلك للأسباب التالية:

- ضعف إدراك فوائد صيانة مصائد البخار وشبكات التوزيع ودورها في خفض تكاليف الطاقة
- الجهل بكيفية تطبيق برنامج صيانة مصائد البخار والشبكات التابعة لها
- التركيز على أنظمة أكثر سهولة
- نقص الموارد، وصعوبة حساب العائد على الاستثمار من تنفيذ البرنامج.

الشكل (2-39): إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في شبكة توزيع البخار



المصدر: Rodríguez, M., 2024

• تعزيز التكامل بين شبكات بخار الماء والطاقة الكهربائية

يمكن خفض تكاليف إنتاج توليد الطاقة من خلال تعزيز التكامل بين إنتاج بخار الماء اللازم لعمليات التكرير وتوليد الكهرباء، أو ما يسمى بالإنتاج المشترك للحرارة والطاقة Combined Heat and Power Production-CHP. وتوفر هذه الفرصة إمكانية الاستفادة من الوقود الذي تنتجه المصفاة في إنتاج البخار وفي نفس الوقت في توليد الطاقة الكهربائية، فتمكن بذلك من تلبية حاجتها من الطاقة الكهربائية، وتصدر الفائض إلى الشبكة العامة. لقد أثبتت التجربة العملية أن أنظمة التوليد المشترك تعمل على تحسين كفاءة الطاقة الإجمالية في المصافي بنسبة تتراوح بين 25% و30%. **الشكل 2-40** مخطط التكامل بين شبكات الوقود والبخار والكهرباء في مصفاة النفط.

تحصل المصفاة على فوائد نتيجة التكامل بين شبكات الوقود وبخار الماء والكهرباء، أهمها:

- توفير تكاليف نقل الوقود المستخدم في توليد الطاقة الكهربائية نظراً لتوفره في المصفاة.
- تجنب الخسائر الناتجة عن هدر الطاقة نتيجة تقريب المسافة بين محطة توليد الكهرباء والمصفاة.
- الاستفادة من الحرارة الضائعة من مولدات البخار في تدوير عنفات توليد الطاقة الكهربائية.
- الاستفادة من البخار الفائض عن حاجة المصفاة في توليد الكهرباء.

الشكل 2-41 نموذجاً لاستخدام وحدة التوليد المشترك في موقعين متقاربين حيث تمكنت مصفاة النفط في الموقع A أن تستبدل أحد مراحل توليد البخار القديمة ذي الكفاءة المنخفضة باستيراد بخار ماء عالي الضغط من مجمع البتروكيماويات المجاور (الموقع B) (الخط المتقطع)، ومن وحدة توليد مشترك أنشئت في موقع قريب من الموقعين A و B.

2-7-6: منظومة تصريف الغازات إلى الشعلة

تتصل كافة المعدات في الوحدات الإنتاجية بشبكة تجمع عبر صمامات أمان وخطوط أنابيب، تستخدم للتصريف الآمن للغازات والسوائل الخطرة التي يتطلب تحريرها إلى خارج الوحدة، سواء بطريقة يدوية أو آلية، وذلك عند توقف الوحدات الإنتاجية وتفريغها لإجراء أعمال الصيانة، أو في الحالات الطارئة. تتكون وحدة تصريف السوائل والغازات من مجموعة من الأوعية لفصل السوائل وترحيلها إلى خزانات خاصة ليعاد تكريرها، أما الغازات الخفيفة فترحل لحرقها في عمود الشعلة (Emam, A., 2015).

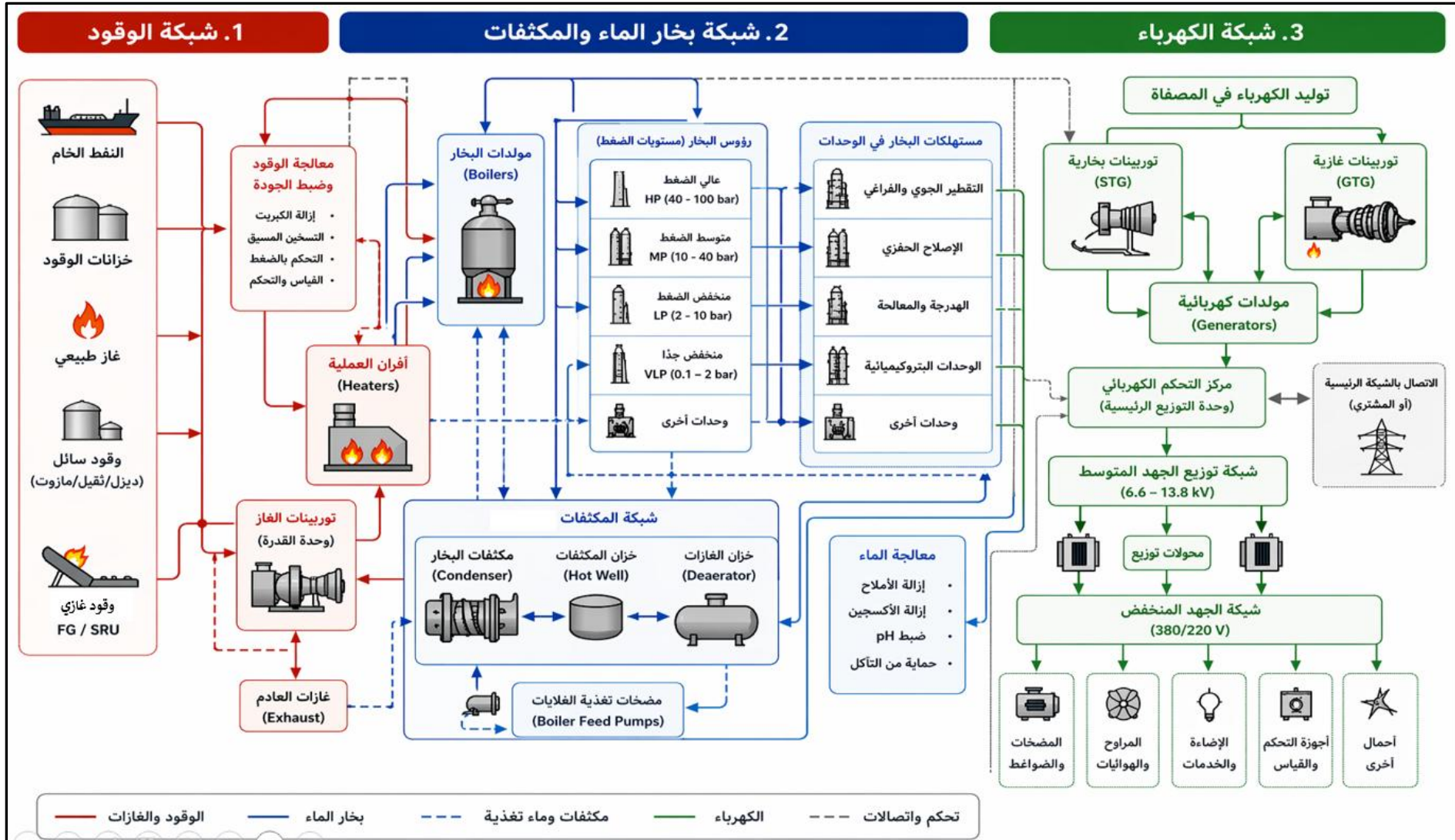
يمكن استرجاع الغازات الداخلة إلى الشعلة من مختلف وحدات المصفاة لاستخدامها كوقود في أفران المصفاة. **الشكل 2-42** مخطط وحدة استرجاع غازات الشعلة في مصفاة تكرير النفط.

2-7-7: منظومة مياه التبريد

تستهلك مصافي النفط كمية كبيرة من الطاقة في عمليات التبريد بالمياه، وبالتالي فإن أداء منظومة مياه التبريد ينعكس على كفاءة استهلاك الطاقة في المصفاة. فعلى سبيل المثال، يؤدي ارتفاع درجة حرارة مياه التبريد إلى ارتفاع درجة حرارة وضغط منظومة أعلى عمود التقطير، مما ينتج عنه زيادة في الحمل الحراري على غلاية العمود لتحقيق المواصفات المطلوبة للمنتجات.

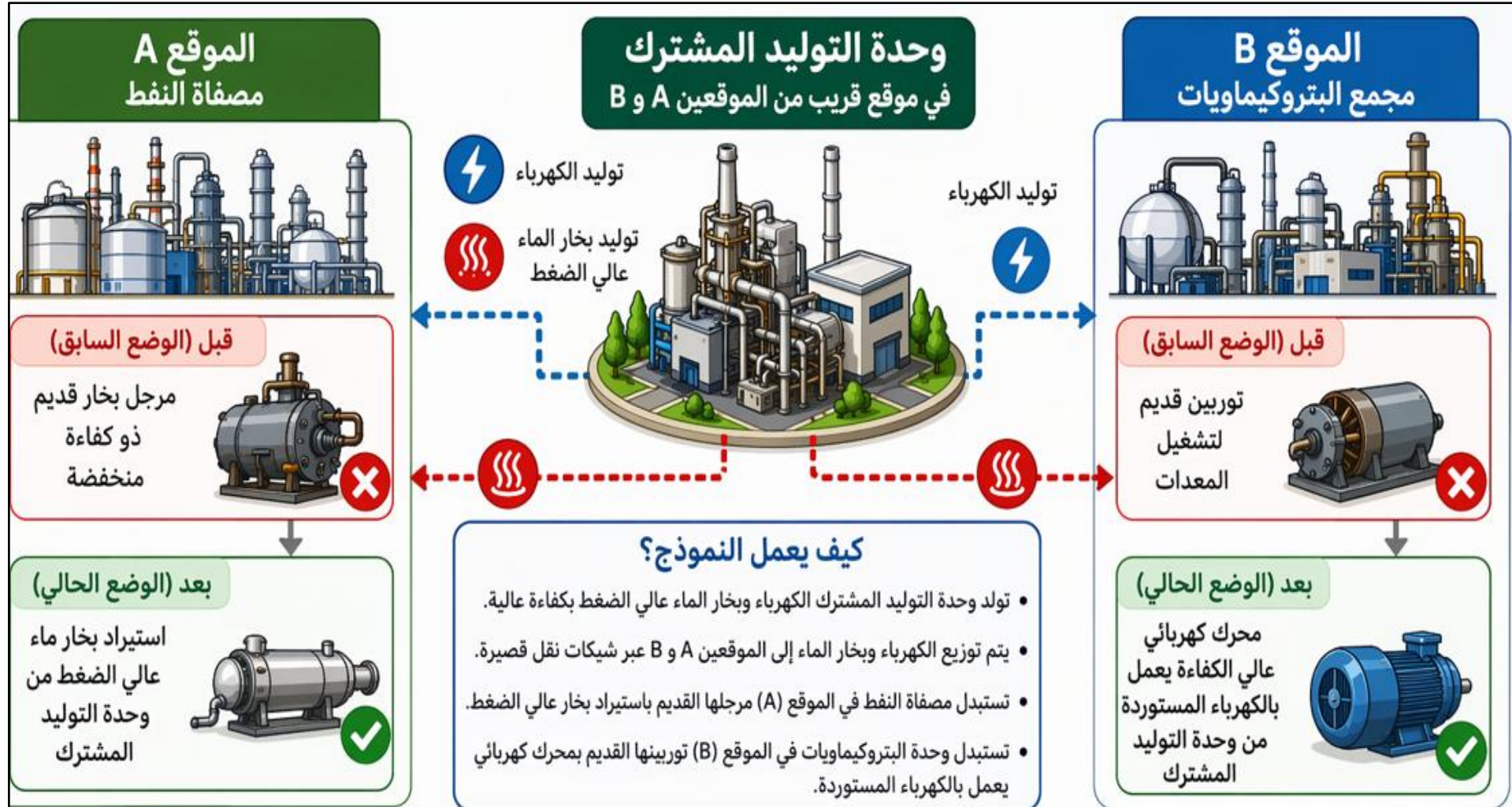
تتكون منظومة التبريد من جزئين رئيسيين، أبراج التبريد وخطوط توزيع مياه التبريد. وفيما يلي أهم فرص تحسين كفاءة الطاقة في هذين الجزئين من المنظومة. (Morrison, F., 2014)

الشكل (2-40): مخطط التكامل بين شبكات الوقود وبخار الماء والكهرباء في مصفاة النفط



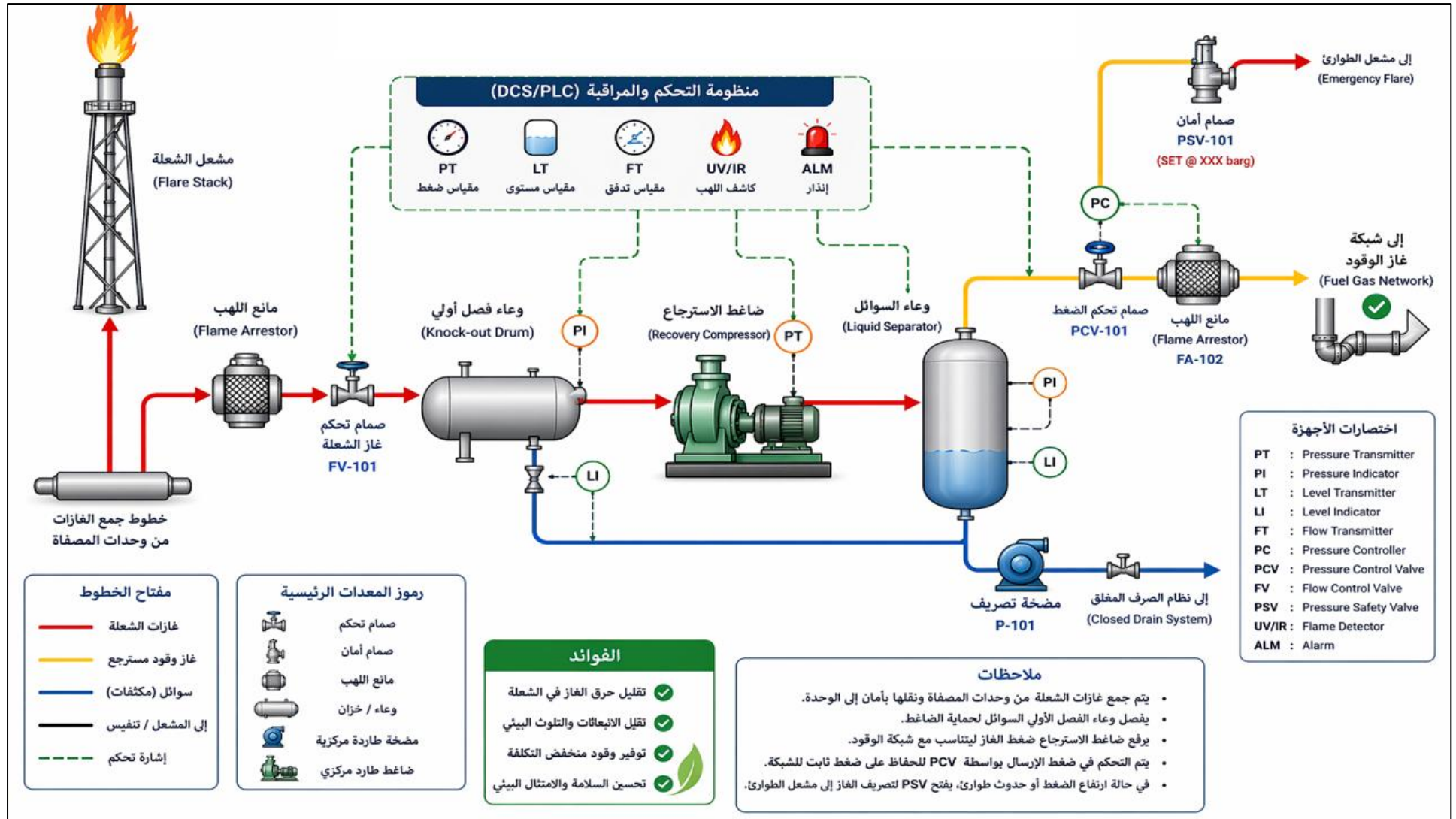
المصدر: Zand, M., & Zakizadeh, M., 2024

الشكل (2- 41): نموذج استخدام وحدة التوليد المشترك



المصدر: Hoong, C., et al., 2016

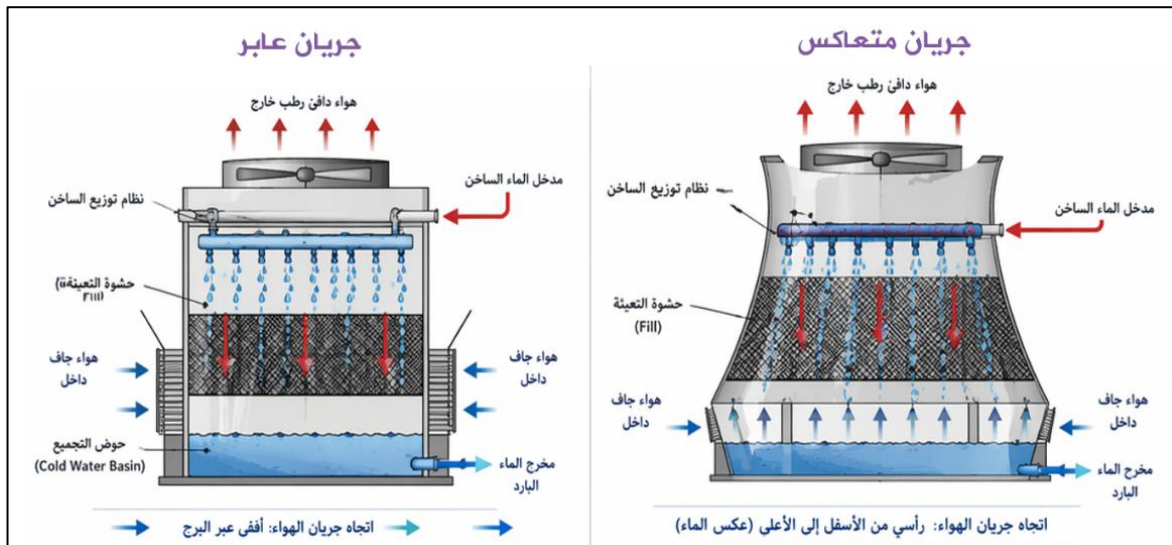
الشكل (2-42): مخطط وحدة استرجاع غازات الشعلة في مصفاة تكرير النفط



المصدر: Evbuomwan, B., et al., 2018

- **استبدال حشوات أبراج التبريد القديمة** بأخرى متطورة ذات كفاءة أعلى، وذلك بسبب تصميمها الجديد الذي يعزز تلامس المياه الساخنة الداخلة إلى أبراج التبريد مع الهواء الجوي.
- **ضبط معدل جريان المياه بالقيمة المثالية**، حيث أن معدل التدفق المنخفض يساهم في توفير استهلاك الطاقة، إلا أن معدل التدفق العالي بالمقابل يخفض من الحاجة إلى تشغيل عدد المراوح الهوائية مما يؤدي إلى خفض استهلاك الطاقة الكهربائية.
- **تعديل نموذج جريان المياه**، فعندما يكون اتجاه جريان الماء في الأبراج متعاكس مع الهواء Counter-flow فإن طاقة التبريد تكون أعلى من الجريان العابر Cross-flow. **الشكل 2-43** يبين مقارنة بين نوعي جريان تيار الماء والهواء في أبراج مياه التبريد.

الشكل (2-43): مقارنة بين نوعي جريان تيار الماء والهواء في أبراج مياه التبريد



المصدر: Morrison, F., 2014

- **اختيار حجم المراوح الهوائية** بحيث تكون سرعة دوران الشفرات أخفض من 12000 قدم/الدقيقة لتفادي حدوث الأعطال الطارئة والمحافظة على زمن تشغيل المروحة أطول مدة زمنية ممكنة، على ألا تنخفض سرعة الهواء الخارج من المروحة عن 12000 قدم/الدقيقة لتفادي تقلب الهواء الساخن الخارج إلى مدخل الهواء البارد إلى المروحة.
- **الاهتمام بجودة مياه التبريد**، من خلال العناية بضبط برنامج المعالجة الكيميائية والفلترة، والتصفية المستمرة، وذلك لضمان خلوها من الرواسب التي تؤدي إلى انسداد المبادلات الحرارية والمبردات، علاوة على انسداد فوهات حشوات الأبراج، والتي تسبب خفض كفاءة التماس بين الماء الساخن وتيار هواء التبريد، وبالتالي ارتفاع استهلاك الطاقة.
- **التأكد من عدم وجود صمامات وتوصيلات غير ضرورية** على شبكة توزيع مياه التبريد لتفادي حدوث عائق يؤدي إلى صرف طاقة أكبر لرفع الضغط.
- **تركيب محركات متعددة السرعات** للتحكم بطاقة عمل المراوح الهوائية ومضخات مياه التبريد عند القيمة المثالية لتفادي هدر الطاقة.

2-7-8: أتمتة منظومة تخزين وتحضير المشتقات النفطية Storage Tanks

تحتوي مصافي النفط على عدد كبير من خزانات النفط الخام والمنتجات الوسيطة والنهائية، وبسعات تكفي لمدة زمنية كافية لتفادي الاضطرابات المحتملة أثناء نقل المواد من مكان إلى آخر. تتشكل المنتجات النهائية من مزيج من عدة مكونات ناتجة من عمليات التكرير المختلفة. وتتم عملية التحضير بسحب نسب محددة من تلك المكونات ووضعها في خزان المنتج النهائي، ثم تؤخذ عينة من هذا الخزان إلى المختبر لإجراء التحاليل اللازمة للتأكد من مطابقة المنتج للمواصفات المطلوبة قبل الشحن إلى مراكز التوزيع. ولضمان الدقة في مواصفات المنتجات وتفاذي الأخطاء التي ينتج عنها منتجات خارجة عن المواصفات المطلوبة تحتاج إلى إعادة تكرير وهدر في الطاقة، تتبع المصافي نظام الأتمتة لجدولة عمليات المزج. يبين الشكل 2-44 سير العمل في منظومة تخزين وتحضير منتجات المصفاة.

الشكل (2-44): سير العمل في منظومة تخزين وتحضير منتجات المصفاة النهائية



المصدر: Ahmednooh, M., et al., 2025

تحتاج بعض المنتجات إلى تسخين أثناء تخزينها عندما تكون درجة لزوجتها عالية في درجات حرارة الطقس العادية، وتتم عملية التسخين بواسطة أنابيب يمرر فيها البخار داخل الخزان، أو بواسطة ملفات تسخين كهربائية Electrical Coils. كما تحتاج منتجات أخرى إلى تبريد عندما تكون درجة كثافتها منخفضة، وذلك لتخفيض نسبة تبخر الهيدروكربونات الخفيفة إلى الجو، وتتم عملية التبريد بواسطة أجهزة تبريد كهربائية. ولتخفيض استهلاك الطاقة في مسخنات ومبردات الخزانات بإتباع الإجراءات التالية: (IPIECA, 2023)

- تخفيض زمن التخزين بإعداد برنامج زمني لتحميل المنتجات في أسرع وقت ممكن.
- ضبط درجة الحرارة عند القيمة المثالية المناسبة.
- إجراء صيانة دورية لأجهزة التسخين والتبريد للكشف عن الأعطال وإصلاحها فور حدوثها.

2-7-9: المعدات الدوارة Rotating Equipment

تستخدم المعدات الدوارة في معظم عمليات مصافي النفط، وتتكون بشكل رئيسي من المحركات الكهربائية والمضخات والضواغط والمراوح، وتستهلك المحركات الكهربائية في أكثر من 80% من إجمالي الطاقة الكهربائية المستهلكة في المصفاة. تتوزع نسب استخدام المحركات الكهربائية في تدوير المضخات بنسبة تصل إلى حوالي 60% من إجمالي المحركات المستخدمة، وضواغط الهواء التي تمثل حوالي 15%، ثم المراوح 9%، والباقي 16% للتطبيقات الأخرى. ويمكن تحسين كفاءة الطاقة وتخفيض استهلاكها في المحركات والمضخات والضواغط والمراوح بإتباع الإجراءات التالية:

• ضبط حجم المحركات والمضخات والضواغط

إن لاختيار الحجم المناسب للمحركات دور كبير في تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط، فعندما يكون المحرك أو الضاغط أكبر من اللازم يؤدي ذلك إلى استهلاك كبير للطاقة دون فائدة.

• اختيار أنواع متطورة من المحركات

توجد أنواع من المحركات ذات كفاءة عالية مصنوعة من مواد عالية الجودة، ومصنعة بطرق متطورة، ومن مزايا هذه المحركات أنها تعمل بدرجة حرارة منخفضة، واهتزاز منخفض، وعمر زمني أطول، فضلاً عن أنها تستهلك طاقة بمعدلات أقل من المحركات التقليدية.

أثبتت التجربة العملية أن استبدال المحرك القديم بأخر ذي كفاءة عالية يعتبر أفضل اقتصادياً من عملية إعادة لف أسلاك المحرك القديم Rewinding، حيث أن عملية إعادة اللف في معظم الأحوال تخفض من كفاءة المحرك الأصلية وتؤدي إلى زيادة في استهلاك الطاقة الكهربائية.

• مراقبة درجة حرارة المحركات الكهربائية

إن المراقبة المستمرة لدرجة حرارة المحرك والتأكد من سلامة معدات التبريد والتهوية تساهم في حماية الملفات من التلف، كما أن ضعف التبريد يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية في المحرك.

• اختبار خصائص زيت تزييت الضواغط والمضخات

يجب إجراء اختبار دوري لزيت تزييت الضواغط والمضخات، وذلك للتأكد من ثبات خصائصه لضمان عدم حدوث اهتراء في الأجزاء المتحركة ينتج عنه زيادة في استهلاك الطاقة.

• استخدام محركات ذات سرعات قابلة للتعديل Adjustable Speed

تلجأ المصافي إلى استخدام محركات ذات سرعات قابلة للتعديل في الحالات التي تتطلب تغيير معدل جريان السائل عبر مضخات الطرد المركزي Centrifugal pumps أو الضواغط، أو عند تعديل في كمية هواء المراوح، حيث يمكن أن تساهم هذه العملية في توفير كبير في استهلاك الطاقة بدلاً من إبقاء المحرك عند سرعة ثابتة، فضلاً عن توفير الناتج عن تخفيف اهتراء أجزاء المحرك وإطالة الفترة الزمنية اللازمة لصيانته.

• استبدال وتجديد المضخات القديمة

أثبتت التجربة العملية أن المضخة تفقد حوالي 10-25 % من كفاءتها خلال عمرها الافتراضي، وقد لا يعود سبب انخفاض الكفاءة فقط إلى قدم المضخة إنما بسبب تغير ظروف تشغيل الوحدة مع الزمن دون مراعاة تعديل الخصائص التصميمية للمضخة بما يتناسب مع ذلك التغير.

• استخدام عدة مضخات على التوازي

يعتبر أسلوب استخدام عدة مضخات على التوازي بدلاً من مضخة واحدة، في حالات التشغيل التي تتغير فيها معدلات الجريان بشكل متكرر، من الإجراءات الفعالة جداً لتوفير الطاقة الكهربائية، وذلك من خلال توقيف إحدى المضخات عند انخفاض الجريان في الخط بدلاً من إغلاق الصمام على خط المادة الخارجة من المضخة في حال وجود مضخة كبيرة واحدة.

• تحسين برامج الصيانة الدورية والوقائية للمضخات وملحقاتها

يساهم تطبيق برامج الصيانة الدورية في تفادي الأعطال الطارئة التي ينتج عنها هدر كبير للطاقة. كما تساهم إجراءات الكشف الدوري على خطوط المضخات والضواغط في الكشف عن احتمالات وجود تجمع للرواسب أو انسداد يؤدي إلى إعاقة مرور السائل، وبالتالي ارتفاع استهلاك الطاقة.

• تحسين جودة سيور نقل الحركة

إن استخدام سيور نقل الحركة ذات خصائص متوافقة مع المعايير الدولية يساعد على تفادي إجهاد المراوح والنواfox وإضعاف كفاءتها.

• شبكات الإنارة

على الرغم من أن نسبة استهلاك الإنارة لا يتجاوز 2% من إجمالي استهلاك الطاقة الكهربائية في مصفاة النفط، إلا أنه من الممكن أن يساهم تطبيق بعض الإجراءات في تحسين كفاءة استخدام الطاقة في المصفاة. من أهم هذه الإجراءات ما يلي: (Narsimha Rao, G., 2015)

- **تركيب حساسات ضوئية** لتنظيم تشغيل مصابيح الإنارة عند الضرورة وإغلاقها آلياً عند عدم الحاجة إليها. من هذه الحساسات ما ينظم عمل مصابيح الإنارة في الأماكن المشغولة بالأشخاص وتتوقف آلياً عند خروجهم من المكان.
- **استبدال مصابيح الإنارة التقليدية** بأخرى غازية ذات كفاءة أعلى وتستهلك طاقة أقل.
- **استخدام مرايا عاكسة** تساعد في توجيه ضوء المصابيح إلى الأسفل، أو إلى الأماكن التي تحتاج إلى تكثيف الإنارة عليها، وبالتالي يمكن تخفيض عدد المصابيح اللازمة لإنارة منطقة محددة.
- **تخفيض توتر التيار** المغذي لشبكات الإنارة، وهذا يساعد على تخفيض استهلاك الطاقة بمعدل يمكن أن يصل إلى 30%.

2-8: تطبيق التقنيات الحديثة

أحدثت التطورات التكنولوجية ثورةً في صناعة النفط والغاز، لا سيما في مجال تحسين كفاءة الطاقة. وقد ساهمت هذه التطورات في خفض التكاليف، وتعزيز الاستدامة، وتقليل الأثر البيئي، من خلال تعزيز إجراءات السلامة، وتحسين الكفاءة التشغيلية. (Zand, M., & Zakizadeh, M., 2024)

تقوم مراكز الأبحاث العلمية بدور كبير في ابتكار تقنيات جديدة تساهم في تحسين كفاءة الطاقة في كل من عمليات التكرير الأساسية والمساندة، وفيما يلي أهم التقنيات المتبعة:

2-8-1: تطبيق تقنيات التحول الرقمي

تكتسب منظومة القياس والمراقبة والتحكم أهمية كبيرة في إدارة كفاءة الطاقة وذلك من خلال دورها الهام في تحسين دقة وجودة البيانات المتعلقة بظروف التشغيل، حيث تساهم في اختصار الزمن اللازم لإنجاز المهام المعقدة، وتحسين استقرار عمل وحدات المصفاة، وبالتالي تخفيض معدل التوقفات الطارئة التي ينتج عنها هدر كبير في الطاقة.

ساهمت التطورات الحديثة التي أدخلت على نظم القياس والتحكم في تطوير عمل مصافي تكرير النفط من خلال ابتكار أجهزة مراقبة متطورة لمستويات استهلاك الطاقة، منها ما يطبق على مستوى كافة وحدات المصفاة، ومنها ما يتناول تحسين كفاءة استهلاك الطاقة في بعض الأجهزة والمعدات الخاصة، ويمكن تصنيف فرص تحسين كفاءة الطاقة في المصفاة باستخدام أجهزة التحكم المتطورة من خلال المجالات التالية: (Gardner, J. 2024)

- تطوير دقة أجهزة القياس الحقلية.
 - تحسين سرعة تجاوب معدات التحكم النهائية كالصمامات والمحركات متعددة السرعة.
 - تحسين أداء دارات التحكم ببعض المعدات المستقلة، كأبراج التقطير والغلايات والأفران.
 - تعزيز فعالية المراقبة لظروف تشغيل المصفاة ومعدلات استهلاك الطاقة في معدات المصفاة.
- يتيح دمج التقنيات الحديثة مثل إنترنت الأشياء IoT والذكاء الاصطناعي AI وتحليلات البيانات المتقدمة للشركات تحسين ممارسات إدارة الطاقة لديها من خلال جمع البيانات وتحليلها في الوقت الفعلي، وهذا يمكن شركات التكرير من اكتساب رؤى شاملة حول أنماط استهلاك الطاقة، وتحديد أوجه القصور، واتخاذ قرارات تعزز ترشيد الطاقة وخفض التكاليف.

من جهة أخرى، يساهم الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي Machine learning في تعزيز الصيانة التنبؤية، مما يؤدي إلى تقليل فترات توقف الإنتاج. كما تُسهّل التكنولوجيا دمج مصادر الطاقة المتجددة في صناعات تكرير النفط. **الشكل 2-45** نماذج تطبيق التقنيات الرقمية في مصافي تكرير النفط

الشكل (2-45): نماذج تطبيق التقنيات الرقمية في مصافي تكرير النفط



المصدر: (Gardner, J. 2024)

تشير الخبرة العملية أن تطبيق التحول الرقمي يمكن أن يؤدي إلى توفير في استهلاك الطاقة بمعدل يتراوح بين 10-25%، وذلك من خلال ما يلي:

- تحسين العمليات (التحكم الآلي في العمليات والتحسين في الوقت الحقيقي) 3-8%
- أنظمة إدارة الطاقة 5-10%
- الصيانة التنبؤية 2-5%
- تحسين المرافق 5-15%

أما الفوائد الاستراتيجية التي تتجاوز خفض الطاقة فهي:

- خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بما يساعد في تحقيق أهداف إزالة الكربون.
- خفض تكاليف التشغيل
- تحسين موثوقية المصفاة وزيادة وقت التشغيل
- تعزيز الامتثال لمتطلبات التشريعات البيئية
- تحسين التكامل مع مصادر الطاقة المتجددة والهيدروجين

كما تشير تقارير وكالة الطاقة الدولية إلى أن الرقمنة والذكاء الاصطناعي يخلقان مستويات جديدة من الكفاءة في الصناعات الكثيفة استهلاك الطاقة، وذلك من خلال تحسين التنبؤ، ورفع دقة التحكم، وتحويل البيانات المتفرقة إلى قرارات قابلة للتنفيذ. (IEA, 2025)

تكمن أهمية هذه التطبيقات في أنها تساهم في تسريع اكتشاف انحرافات ظروف التشغيل أو الأعطال التي يؤدي حدوثها إلى زيادة في استهلاك الوقود وبخار الماء والكهرباء، وإلى زيادة في الانبعاثات الكربونية. فالتوأم الرقمي، على سبيل المثال، ليس مجرد تمثيل ثلاثي الأبعاد أو نموذج محاكاة تقليدي، بل هو تمثيل متصل بالبيانات الآنية، وقادر على إنتاج مؤشرات أداء لا يمكن قياسها بشكل مباشر، كما يمكنه توفير اختبارات ماذا لو (What if) بسرعة عالية تمكن المشغل من اتخاذ القرار التصحيحي بشكل فوري وآمن.

فيما يلي نظرة عامة حول كيفية مساهمة التحول الرقمي في خفض استهلاك الطاقة:

• التحكم المتقدم بالعمليات (APC) والتحسين في الوقت الفعلي (RTO)

تستخدم تقنية التحكم المتقدم بالعمليات في النماذج الديناميكية وأجهزة الاستشعار وخوارزميات التحكم لتحسين عمليات التكرير باستمرار، وضبط متغيرات العملية (درجة الحرارة، والضغط، ومعدلات التدفق) في الوقت الفعلي، وتساهم في خفض استهلاك الطاقة الزائد عن القيم التصميمية، وتحسين كفاءة استرجاع الحرارة المفقودة.

• التوأم الرقمي ونماذج المحاكاة

وهي نسخة رقمية طبق الأصل من وحدات التكرير مثل أبراج التقطير، ووحدات التكسير الحفزي، ومحاكاة سيناريوهات التشغيل المختلفة وأنماط استهلاك الطاقة، وتساهم في تحديد ظروف التشغيل المثلى، ودعم إزالة الاختناقات وإعادة تصميم العمليات لتحسين كفاءة الطاقة، وتحسين أداء عمليات الصيانة وقرارات التخطيط، وتقليل هدر الطاقة الناتج عن التجربة والخطأ.

• الصيانة التنبؤية (القائمة على الذكاء الاصطناعي/التعلم الآلي)

تعمل نماذج الذكاء الاصطناعي على تحسين عمليات التكرير مع مراعاة القيود (المواد الخام، ومواصفات المنتج، وتكاليف الطاقة)، وتحقيق التوازن بين أهداف الإنتاج والحد الأدنى من مدخلات الطاقة، وتحسين استخدام الهيدروجين، ومعدلات احتراق الأفران، وأنظمة المرافق.

يستخدم التعلم الآلي للتنبؤ بأعطال المعدات بناءً على بيانات الاهتزاز ودرجة الحرارة والأداء، وذلك لمنع الأعطال الناتجة عن الترسبات أو التسريبات أو تراجع جودة المعدات، وضمان تشغيل المضخات والضواغط والمبادلات الحرارية بأقصى كفاءة. فعلى سبيل المثال يمكن أن يؤدي توضع الرواسب في المبادلات الحرارية إلى زيادة استهلاك الوقود بنسبة 5-15% إذا لم يتم اكتشافه مبكراً.

• أنظمة إدارة الطاقة (EMS)

يحتوي نظام إدارة الطاقة على منصات مركزية لمراقبة وتحليل وتحسين استهلاك الطاقة في جميع أنحاء المصفاة، وتقوم بقياس أداء الطاقة، مقارنةً بأفضل الممارسات، وتقديم معلومات في الزمن الفعلي، وموازنة الأحمال بين الوحدات، والكشف السريع عن أوجه القصور في استهلاك الطاقة، وتحسين استخدام شبكات البخار، والطاقة، والهيدروجين، وتقليل انخفاضات الضغط والفقد في شبكات البخار، وتحسين التوليد المشترك للطاقة والحرارة والطاقة، وتعزيز كفاءة استرجاع غازات الشعلة.

• أجهزة استشعار إنترنت الأشياء وتحليلات البيانات

وهي أجهزة استشعار ذكية تنشر في مختلف المعدات (المبادلات الحرارية، والأفران، والتوربينات) لجمع البيانات وتحليلها بشكل مستمر، وذلك بغرض تحديد مصادر فقد الطاقة الخفية، مثل تسربات البخار، وأعطال العزل.

• أنظمة المراقبة اللحظية

تعتبر عملية المراقبة أحد الحلول البسيطة والفعالة لخفض تكاليف الطاقة، وضمان أن كل حلقة تحكم تعمل وفقاً للأداء المصمم لها. فعلى سبيل المثال، تمكن أحد المجمعات البتروكيمياوية في جنوب أفريقيا من خفض تكلفة البخار في الأفران بمقدار 3.6 مليون دولار أمريكي سنوياً باستخدام أنظمة المراقبة في الوقت الفعلي، وذلك من خلال تقليل هدر الغازات القابلة للاحتراق، وتدوير غازات الاحتراق وإعادة استخدامها في أنظمة الوقود.

• المنصات الرقمية

تساهم المنصات الرقمية في جدولة عمليات التكرير بما يقلل من إعادة المعالجة والإنتاج غير المطابق للمواصفات، إضافة إلى تحسين اختيار أنواع النفط الخام التي تستهلك طاقة أقل في عمليات التكرير، والتي تتطلب معالجة أقل استهلاكاً للطاقة.

من جهة أخرى تساعد المنصات الرقمية في تحسين سلسلة التوريد والتخطيط، ورفع كفاءة القوى العاملة، وبالتالي تقليل هدر الطاقة الناتج عن الخطأ البشري.

من الأمثلة العملية على تطبيق التحليلات والذكاء الاصطناعي مبادرة أدنوك الرقمية، حيث أطلقت شركة بترول أبو ظبي الوطنية أدنوك ADNOC مبادرة "بانوراما" الرقمية، وهي مركز قيادة رقمي، يعتبر منصة شاملة على مستوى المؤسسة لتجميع بيانات التشغيل في الوقت الفعلي من مختلف المواقع التشغيلية والشركات التابعة لها، وتطبيقات التحليلات والذكاء الاصطناعي وتقنيات عرض البيانات لدعم عملية اتخاذ القرارات. وتشير النتائج التي تعلن عنها الشركة إلى أن مبادرة "بانوراما" حققت قيمة مضافة تتجاوز مليار دولار أمريكي منذ اكتمالها في عام 2017، إضافة إلى تحقيق وفورات تتراوح بين 60 - 100 مليون دولار أمريكي من خلال تحسين العمليات وتقليل زمن التوقف.

أما شركة أرامكو السعودية فقد استخدمت الذكاء الاصطناعي والتحليلات المتقدمة والروبوتات في مصفاة ينبع لزيادة الربحية مع خفض الانبعاثات، وذلك في إطار تحديث الأنظمة القديمة ونشر التقنيات الرقمية كجزء من رحلة تحول منظمة.

كما تضمن المشروع استخدام نماذج محاكاة العمليات والنماذج الرقمية، وذلك لتوسيع الطاقة الإنتاجية، والتخطيط، والتقييم التقني، والاقتصادي. وقد أظهرت النتائج زيادة في الطاقة الإنتاجية بمقدار 100 ألف برميل يومياً. وتشير تقارير أخرى إلى أن أرامكو تطبق نماذج ذكاء اصطناعي هجينة في وحدات التكرير بدقة تنبؤية عالية لتحسين التخطيط والكفاءة التشغيلية.

يشير المثالان إلى أن التحول الرقمي أصبح مساراً عملياً وضرورياً لخفض استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط. وتظهر تجارب شركات أدنوك، وأرامكو السعودية، أن الفوائد لا تقتصر على التحسين

الرقمي للوحدات الفردية فحسب، بل تشمل التكامل الأوسع نطاقاً بين المرافق والصيانة والتخطيط وإدارة القرارات.

2-8-2: تقنيات تعزيز الكفاءة التشغيلية

أحد الأمثلة العملية لتطبيق التكنولوجيا في تحسين الكفاءة التشغيلية مشروع استخدام أجهزة قياس ميدانية في مجمع بتروكيماويات ليونديل باسيل، في تشانلفيو، تكساس، الولايات المتحدة الأمريكية.

يُعدّ مُجمّع ليونديل باسيل أحد أكبر منشآت البتروكيماويات على ساحل الخليج، حيث يمتد على مساحة تقارب 4000 فدان ويعمل به أكثر من 1900 شخص على بُعد 20 ميلاً شرق وسط مدينة هيوستن. يعتمد المشروع على تطبيق تقنية ذكية لاسلكية للحصول على بيانات التشخيص من أجهزة القياس الميدانية الذكية وغيرها من المعدات.

أثبت مشروع الاختبار أن الاتصالات اللاسلكية مناسبة جداً للاستخدام في وحدات التكرير والبتروكيماويات القائمة، حيث أن أنظمة التحكم القديمة توفر للمشغلين والعاملين في الصيانة والموثوقية معلومات ضئيلة عن حالة الأجهزة الميدانية الحيوية.

تعرض معلومات الجهاز على جهاز كمبيوتر المستخدم في ورشة الأجهزة، حيث يقوم فني الأجهزة بفحص شاشة تنبيهات إدارة أجهزة التحكم يومياً بحثاً عن علامات تدهور الأداء أو انخفاضه. في حال ملاحظة أي تغيير في الحالة، يكون لدى المشرفين متسع من الوقت لتحديد نوع الصيانة أو الإصلاح اللازم وتوقيته.

ساهم المشروع في خفض كبير في احتمالية حدوث أي عطل دون سابق إنذار، علاوة على رفع مستوى الأمان في شركة ليونديل وتقليل عمليات الصيانة الوقائية الدورية لهذه الأجهزة من شهرياً إلى مرة كل ثلاث سنوات. (Emerson, 2022)

2-8-3: استخدام محفزات متطورة

تسعى الشركات المصنعة للمحفزات Catalysts إلى تطوير أنواع جديدة ذات كفاءة أعلى بدرجات حرارة أخفض، مما يساعد على تخفيض كمية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة التفاعل. حيث أثمرت جهود البحث والتطوير إلى تصنيع محفزات نتج عنها تقليل استهلاك الطاقة بمعدل 5-20 % في بعض العمليات، مثل المعالجة الهيدروجينية Hydroprocessing.

2-8-4: كهربة عمليات صناعة التكرير

يشير مصطلح كهربة العمليات إلى استخدام الكهرباء لتلبية احتياجات الطاقة التي كانت تلبى عادةً بالوقود التقليدي. وقد أصبحت الكهرباء حجر الزاوية في استراتيجيات التخفيف من آثار تغير المناخ في العديد من الصناعات نظراً لقدرتها على تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري بشكل كبير، حيث أن العمليات التي تعمل بالكهرباء غالباً ما تكون أكثر كفاءة في استخدام الطاقة من العمليات التقليدية التي تعمل بالوقود الأحفوري. على سبيل المثال، يمكن لتقنيات التسخين الكهربائية أن تزيد من كفاءة الطاقة بأكثر من 20% مقارنةً بالسخانات التقليدية التي تعمل بالغاز. ويرجع ذلك إلى إمكانية تحويل

الكهرباء بالكامل إلى طاقة حرارية دون أي خسائر حرارية أو بخسائر منخفضة، على عكس غاز المداخل الناتج عن السخانات التي تعمل بالغاز، والذي يتطلب أنظمة استرداد حرارة مكثفة. ويمكن تعزيز ذلك بشكل خاص أثناء العمليات المؤقتة بفضل سرعة بدء التشغيل أو إيقاف التشغيل والتحكم الدقيق. أيضاً، عند التشغيل بحمل منخفض، ستظل السخانات الكهربائية عالية الكفاءة في استخدام الطاقة مقارنةً بالسخانات التي تعمل بالغاز وغلايات البخار. يمكن استخدام المحركات الكهربائية الموفرة للطاقة (بكفاءة طاقة تصل إلى 95% تقريباً) لتشغيل الضواغط. في المقابل، يمكن أن تصل كفاءة طاقة التوربينات البخارية إلى حوالي 25% في النوع المكثف.

تتميز طريقة التسخين الكهربائي بأنها أكثر كفاءة، من طرق التسخين بالوقود، وبالتالي يمكن تجنب الفقد الذي يحصل أثناء حرق الوقود التقليدي، وتوفير حوالي 50% من كمية الوقود المستهلك. إلا أن عملية التسخين الكهربائي لم تطبق في صناعة التكرير إلا ضمن مجالات محدودة على الرغم من تطبيقها في العديد من الاستخدامات الصناعية. وقد سجلت بعض حالات استخدام طريقة التسخين الكهربائي بدلاً من الوقود في توليد بخار الماء اللازم للاستهلاك في عمليات مصافي تكرير النفط يمكنها الوصول بدرجة حرارة بخار الماء إلى 350 °م. كما أن تحسين كفاءة الطاقة من خلال الكهرباء يمكن أن يحقق فوائد مالية كبيرة، حيث تمثل الطاقة حالياً حوالي 60% من تكاليف التشغيل لمصافي الاتحاد الأوروبي. وقد تضاعفت هذه النسبة على مدار العشرين عاماً الماضية بسبب تزايد صرامة مواصفات المنتجات، وارتفاع تكاليف الطاقة، وزيادة تعقيد المصافي.

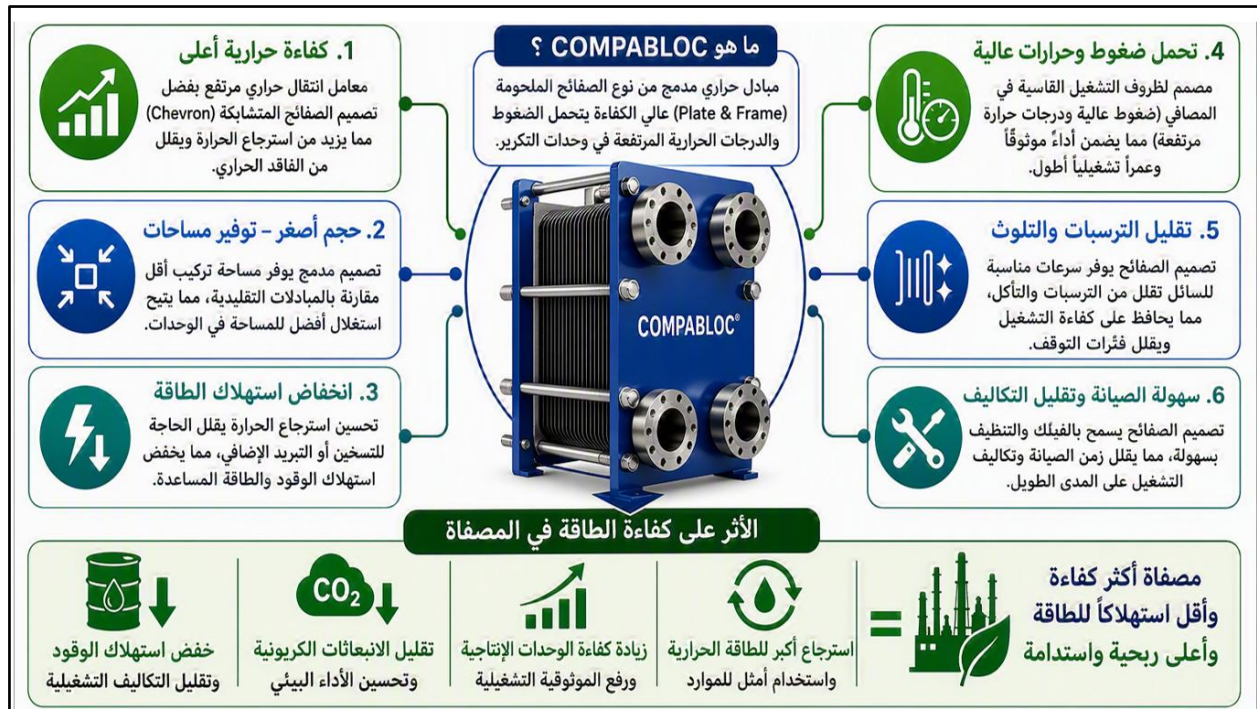
تعتمد إمكانية الكهرباء في المصفاة على عدة عوامل، منها تكوين العملية، ومزيج الطاقة المستخدم، ومستوى جاهزية التكنولوجيا. وقد بدأت بعض المصافي باستخدام الكهرباء على نطاق ضيق. فعلى سبيل المثال تطبيق تقنية التسخين المرافق للأنابيب باستخدام المسخانات الكهربائية بدلاً من المسخانات البخارية التقليدية، كما استخدمت سخانات كهربائية صغيرة الحجم لعمليات تنشيط المحفزات، أو تسخين أنابيب الغاز أو زيت التشحيم. (Schneider Electric, 2023)

2-8-5: استخدام مبادلات حرارية متطورة

من التقنيات المتطورة في مجال تحسين التبادل الحراري استخدام مبادل من نوع كومابلوك، حيث انتشر بشكل كبير في السنوات الماضية، وخصوصاً في وحدات التقطير الجوي والفراغي، وذلك نظراً لخصائصه التالية:

- **كفاءة مُحسنة:** كفاءة طاقة أعلى بثلاث إلى خمس مرات من المبادل الحراري الأنبوبي التقليدي.
- **انخفاض تكاليف الصيانة:** نتيجة مقاومته لتوضع الرواسب مما يمكنه من العمل لفترات أطول بثلاث مرات بين عمليات الصيانة/التنظيف مقارنةً بالمبادل التقليدي.
- **حجم أصغر:** تصميمه المُدمج يشغل مساحة أقل من المبادل الحراري الأنبوبي التقليدي.
- **متانة وقوة تحمل:** يعمل في درجات حرارة عالية مع مجموعة واسعة من المواد الكيميائية القوية وتحت ضغط عال (يصل إلى أكثر من 400 درجة مئوية و42 بار).
- **مرونة عالية:** حجمه المُدمج يجعله مرناً ومناسباً لمجموعة واسعة من التطبيقات. **الشكل 2-46**

الشكل (2-46): مزايا المبادل الحراري المتطور كومباكبلوك



المصدر: Picón-Núñez, M. et al., 2022

2-9: دمج الطاقة المتجددة مع الوقود الأحفوري في عمليات التسخين

من سبل تخفيض الاعتماد على الوقود الأحفوري في مصافي تكرير النفط استخدام أنظمة الطاقة الهجينة المستدامة التي تجمع بين مصادر الطاقة المتجددة وأنظمة الطاقة التقليدية. وقد تم دراسة هذه التجربة في مصفاة ينبع، المملكة العربية السعودية، باستخدام برج الطاقة الشمسية المركز. أظهرت النتائج أن النظام قادر على توفير حوالي 131 طناً من زيت الوقود يومياً، مما أدى إلى تخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 414 طناً يومياً، مع الحفاظ على كفاءة الطاقة بنسبة 82.4%. وتتيح هذه النتائج فرصة التحول نحو أنظمة طاقة أكثر استدامة. (Rafeek, M., et al., 2025)

2-10: تعزيز الوعي بأهمية ترشيد استهلاك الطاقة

تقوم بعض مراكز الأبحاث وشركات النفط العالمية بتبادل الخبرات حول أفضل الممارسات التي توصلت إليها لتحسين كفاءة الطاقة في منشآتها النفطية، علاوة على تنظيم حملات توعية بأهمية تطبيق إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة ودوره في خفض الانبعاثات وحماية البيئة من التلوث.

تلعب عملية التواصل بين العاملين في الأقسام دوراً مهماً في تنبيه المشغلين إلى مواعيد تنفيذ الأعمال الضرورية، علاوة على إتاحة الفرصة لتبادل الأفكار والآراء حول المشكلات التي تسبب هدراً في الطاقة، فعلى سبيل المثال، لوحظ في إحدى وحدات التقطير وجود انسداد في أحد المبادلات الحرارية الأولية مما أدى إلى إخراجها من دائرة العمل لإجراء عمليات التنظيف الاعتيادية، وبعد الانتهاء من عملية التنظيف قام المسؤول عن الصيانة بإعلام رئيس مجموعة المشغلين، ونظراً لعدم وجود نظام تسجيل ملاحظات متطور في القسم، لم يتم إعلام المجموعة القادمة عن جاهزية المبادل الحراري وإعادةه إلى

دائرة العمل، فبقي على هذا الوضع أكثر من ثلاثة أشهر بينما لم يستغرق إعادة المبادل إلى دائرة العمل سوى ساعات معدودة، وقد نتج عن هذا الخطأ هدر في الطاقة بقيمة مائة ألف دولار أمريكي.

كما يمكن تعزيز مشاركة العاملين في مشاريع تحسين كفاءة الطاقة من خلال الإعلان عن النتائج التي أمكن الحصول عليها مقارنة بفترات زمنية سابقة، إضافة إلى دمج العاملين في دورات تدريبية، دورية خارجية وفي موقع العمل لرفع قدرتهم على التحكم بظروف تشغيل الوحدات وخصوصاً في الحالات الطارئة التي قد تؤدي إلى خسائر كبيرة في الطاقة. (DSS, 2023)

2-11: دراسة حالة: مصفاة ريبسول (إسبانيا)

تشير هذه الحالة إلى دور تطبيق التحسين في الزمن الفعلي (RTO) والتحكم المتقدم في العمليات (APC) في تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة ريبسول - إسبانيا

تبلغ الطاقة التكريرية للمصفاة نحو 220,000 برميل/يوم، وهي مصفاة عالية التعقيد التكنولوجي، ومتكاملة مع وحدات إنتاج بتروكيماويات، إضافة إلى زيوت التزيت والشحوم وزيت الوقود. كما تحتوي على نظام مرافق متقدم يشمل: البخار، غاز الوقود، الطاقة الكهربائية، والتوليد المشترك.

2-11-1: المكونات الرئيسية لمشروع مصفاة ريبسول

يتكون مشروع مصفاة ريبسول من النظم التالية:

- التحسين في الزمن الحقيقي (RTO)

وهو نموذج رقمي متصل بالشبكة (Online Model) لنظام الطاقة، ويشمل: شبكات البخار متعددة الضغوط، ومنظومة توليد الكهرباء (التوليد المشترك + التوربينات)، ونظام الوقود الغازي، وأنظمة المياه المتكاثفة. يستقبل بيانات تشغيلية حية ومتحقق منها بشكل مستمر، وينفذ عمليات تحسين تلقائية بشكل دوري، ويقدم توصيات تشغيلية يومية للمشغلين.

- نظام التحكم المتقدم في العمليات (APC)

على الرغم من أن الدراسة تركز على تحسين نظام الطاقة، إلا أنها ترتبط بشكل مباشر بمفاهيم التحكم بظروف التشغيل في الوحدات الرئيسية لرفع مستوى أدائها إلى أقصى كفاءة ضمن حدود الأمان، إضافة إلى التنسيق بين الوحدات التشغيلية ونظام المرافق على مستوى المصفاة

2-11-2: الوظائف الرئيسية للنظام

يهدف النظام بشكل أساسي إلى تحسين الطاقة على مستوى المصفاة بأقل تكلفة ممكنة من خلال تحقيق توازن بين كل من غاز الوقود مقابل الوقود السائل، وإنتاج البخار مقابل توليد الكهرباء، والتوليد الداخلي مقابل الاستيراد/التصدير من الشبكة.

كما يقوم النظام بدعم اتخاذ القرار في الزمن الحقيقي، وتقديم توصيات تلقائية مثل: توزيع الأحمال على الغلايات، وتحسين ضغوط شبكات البخار، وإدارة تشغيل التوربينات، وتوفير رؤية مركزية لجميع تدفقات الطاقة في المصفاة، إضافة إلى المراقبة المستمرة لأداء المعدات للكشف عن: فاقد

الطاقة، وأوجه القصور التشغيلية، والانحرافات عن الأداء الأمثل. وبالتالي إتاحة الفرصة أمام تحقيق حلقة التحسين المستمر.

2-11-3: الفوائد والنتائج المحققة

حقق المشروع النتائج التالية:

- تحسين كفاءة الطاقة، من خلال خفض استهلاك الوقود والكهرباء، وتقليل فاقد البخار.
- خفض التكاليف التشغيلية، من خلال تحسين قرارات اختيار مصادر الطاقة، وإدارة أفضل للمفاضلة بين الوقود الغازي، والكهرباء، والبخار.
- تحقيق التميز في الأداء التشغيلي، من خلال إدارة مركزية لنظام الطاقة، وتحسين جودة قرارات المشغلين، وزيادة الشفافية حول القيود والمتغيرات التشغيلية.
- خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون نتيجة تقليل حرق الوقود

2-11-4: عوامل النجاح الرئيسية

ساهم في نجاح المشروع عوامل عديدة من أهمها:

- التكامل بين الأنظمة، ودمج كامل بين نظام المرافق والوحدات التشغيلية،
- جودة ودقة البيانات التشغيلية وبشكل فوري
- تبني المشغلين للمشروع وتطبيق التوصيات التي يقدمها فريق الإدارة.
- صيانة النموذج وتحديثه باستمرار لضمان استدامته وجودة أدائه.

2-11-5: نتائج تنفيذ المشروع

توضح هذه الحالة أن الفائدة القصوى من المشروع تتحقق عند الدمج بين التحكم المتقدم (APC) والتحسين في الوقت الفعلي (RTO)، والنمذجة الرقمية، بدلاً من تطبيق حلول منفصلة، مما أدى إلى تحقيق تحسين في الإنتاجية بنسبة 1-4 %، وزيادة في العائد الاستثماري بنسبة 5 %، ورفع الأرباح التشغيلية بنسبة 2-10 %.

2-12: دراسة حالة تطبيق فرص تحسين كفاءة الطاقة في مصافي نفط شركة توتال

يمثل استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط حوالي 50% من إجمالي استهلاك الطاقة في مجموعة منشآت شركة توتال الفرنسية، أو ما يعادل 8 مليون طن نفط مكافئ في السنة. وهذا ما يجعل مشروع تحسين كفاءة الطاقة في المصافي التابعة لهذه الشركة في مقدمة اهتمام الإدارة باعتباره فرصة ضرورية لتخفيض تكاليف التشغيل، وتحسين التزام الشركة بمتطلبات التشريعات البيئية

في عام 2010 أطلقت الشركة مبادرة لتحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط التابعة لها.

تضمنت المبادرة التركيز على ثلاث مجالات رئيسية، هي كما يلي: (Coppin, D., et al., 2011)

- تنفيذ مشاريع لتطوير بعض الوحدات الإنتاجية.
- تطبيق برنامج إدارة كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية.
- تأسيس مركز دعم فني جديد.

2-12-1 تنفيذ مشاريع لتطوير بعض الوحدات الإنتاجية

قامت الشركة بتنفيذ مشروعين رئيسيين بهدف تحسين كفاءة الطاقة، وهما مشروع تطوير مصفاة نورماندي، ومشروع تطوير مصفاة بورت آرثر، وفيما يلي نبذة عن هذين المشروعين:

• مشروع تطوير مصفاة نورماندي

يتضمن مشروع تطوير مصفاة نورماندي إعادة تأهيل بعض الوحدات الإنتاجية القديمة وإدخال بعض التطورات التقنية الحديثة عليها ورفع طاقتها الإنتاجية، وإيقاف عدد من الوحدات الأقدم التي أصبح من غير المجدي الاستمرار بتشغيلها، من هذه الوحدات التي سيتم توقيفها، إحدى وحدات تقطير النفط الخام، ووحدة التكسير بالمحفز، وإحدى وحدات أزمنة النافثا، ووحدة بلمرة بالمحفز، وأحد مراحل توليد البخار.

يتضمن الجزء الثاني من المشروع تطوير الوحدات الأخرى وإضافة معدات جديدة، تتميز بكفاءة نقل حراري عالية، وذلك بهدف تعظيم التكامل الحراري في وحدة التهذيب الحفزي Catalytic Reforming مما يسمح بإمكانية الاستغناء كلياً عن أحد الأفران العاملة في هذه الوحدة.

أما الجزء الثالث من هذا المشروع فيتضمن إنشاء وحدة معالجة هيدروجينية جديدة لإنتاج الديزل الحاوي على نسبة منخفضة جداً من الكبريت ULSD، فضلاً عن تحسين كفاءة الطاقة.

بلغت كلفة المشروع حوالي 740 مليون يورو، وساهم في تحسين مؤشر كفاءة الطاقة للمصفاة بمقدار 6%، إضافة إلى تخفيض معدل انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة 30%.

• مشروع مصفاة بورت آرثر Port Arthur

يتضمن مشروع تطوير مصفاة بورت آرثر إنشاء مجمع جديد يتكون من وحدة تفحيم مؤجل، ووحدة تقطير فراغي، ووحدة معالجة هيدروجينية لزيوت الغاز، ووحدة استرجاع كبريت، ووحدات خدمية ومساندة.

يهدف المشروع إلى تمكين المصفاة من تكرير النفط الخام الثقيل وتحويل كامل زيت الوقود إلى مشتقات خفيفة، ورفع معدل إنتاج المصفاة من وقود الديزل الحاوي على نسبة منخفضة جداً من الكبريت (ULSD) بمقدار 3 مليون طن في السنة.

بلغت كلفة المشروع 2.2 مليار دولار، خصص منها حوالي 425 مليون دولار، وعلى الرغم من زيادة طاقة الوحدات الإنتاجية بنسبة 30% أمكن المحافظة على مستوى كفاءة الطاقة.

2-12-2: تأسيس مركز دعم واستشارات فنية

أسس هذا المركز لتقديم الدعم والاستشارات الفنية لمصافي نفط شركة توتال في مشروع تطبيق برنامج إدارة كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية AMPERE، وذلك فيما يتعلق بتنفيذ النشاطات التالية:

- إجراء تقييم مستوى أداء الطاقة، والعمل على إعداد خطط تنفيذية للتحسين.
 - المساعدة في تطبيق الخطط التنفيذية لتحسين كفاءة الطاقة.
 - إجراء مراجعات دورية لنظم إدارة الطاقة في مواقع المصافي.
 - تقديم مساعدة في عمليات تقصي الأعطال التشغيلية، واقتراح الحلول المناسبة عند الطلب.
- يلخص الشكل 2-47 مكونات وفوائد مشروع التحول الرقمي لتحسين كفاءة الطاقة في مصفاة ريبسول

الشكل (2-47): مكونات وفوائد مشروع التحول الرقمي لتحسين كفاءة الطاقة في مصفاة ريبسول



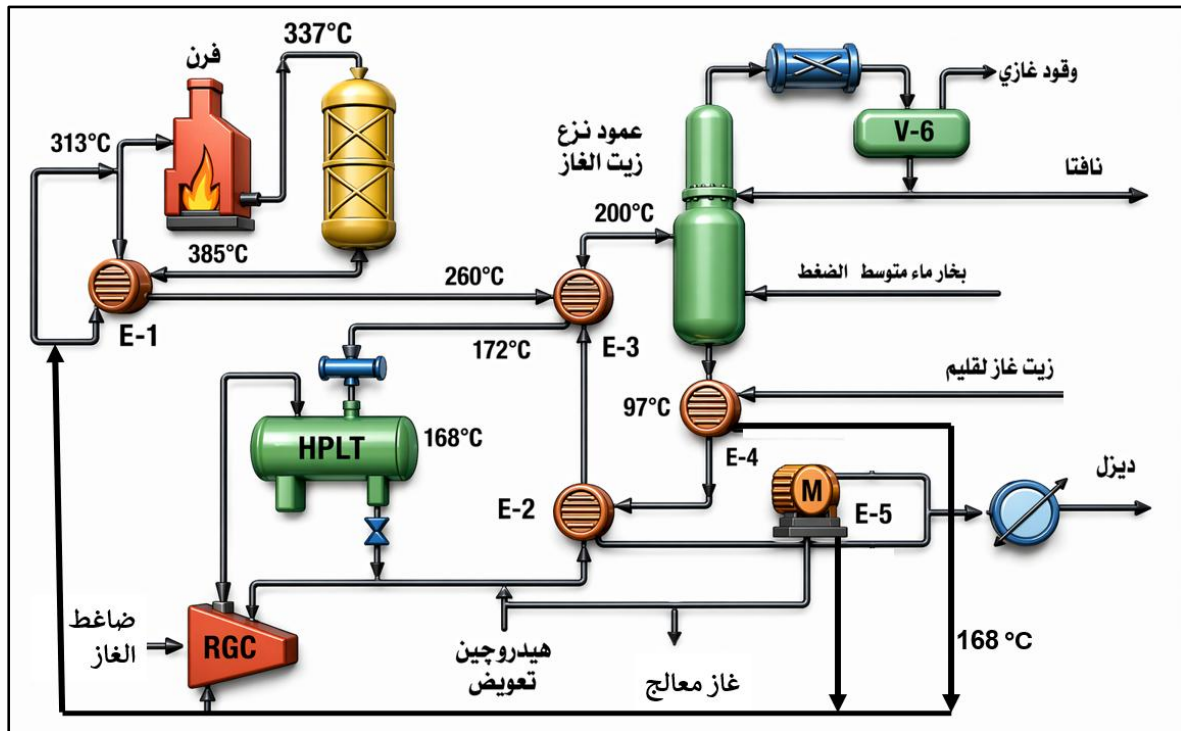
المصدر: Serralunga, F., 2009

2-13: دراسة حالة تحسين كفاءة الطاقة في وحدة معالجة هيدروجينية

انطلق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في وحدة معالجة هيدروجينية في إحدى المصافي الأوروبية بتقييم الوضع الراهن من خلال قياس مؤشر كفاءة الطاقة، وهو مؤشر يمثل النسبة بين معدل استهلاك الطاقة الفعلي للوحدة ومعدل الاستهلاك المثالي المستهدف في تصميم الوحدة، عند قيم تشغيلية متماثلة، أو في القيم المعيارية لمصفاة مماثلة. وقد أشارت نتائج تجربة اختبار الأداء أن قيمة مؤشر كفاءة الطاقة للوحدة يعادل 250%، أي أن معدل استهلاك الطاقة الفعلي يبلغ أعلى بنحو 2.5 ضعفاً من القيمة المطلوبة.

يبين الشكل 2-47 مخطط سير عملية المعالجة الهيدروجينية لزيت الغاز، حيث يسخن زيت الغاز من 160°م إلى 313°م قبل دخوله إلى الفرن في المبادل الحراري E-1 بالاستفادة من حرارة الخارج من المفاعل الذي يمر بعد ذلك إلى المبادل E-3 ليرفع درجة حرارة الداخل إلى برج النزع Stripper، ومنه إلى المبردات الهوائية، ثم إلى فاصل السائل عن الغاز. (Worrell, E., Corsten, M., & Galitsky, C., 2015)

الشكل (2-48): مخطط وحدة المعالجة الهيدروجينية لزيت الغاز



المصدر: Worrell, E., Corsten, M., & Galitsky, C., 2015

بعد تحديد أسباب تدني مستوى مؤشر كفاءة الطاقة في الوحدة تم اقتراح عدة حلول لمعالجة المشكلة، وكان أفضلها زيادة مساحة سطح التبادل الحراري للمبادلين E-1 و E-3 بهدف تحسين الاستفادة من حرارة الخارج من المفاعل، وبالتالي خفض الفرق بين درجة حرارة التيار الساخن (الخارج من المفاعل) 385°م وبين درجة حرارة التيار البارد (اللقيم) قبل دخوله إلى الفرن بمقدار يتراوح بين 40°م إلى 72°م). وقد تم تقييم أربع خيارات يمكن من خلالها زيادة سطح التبادل الحراري، وذلك من حيث التكلفة والمردود الحراري، وزمن استرداد رأس المال، ومدى التوفير في الطاقة الحرارية للفرن، وذلك على النحو التالي:

- تركيب أنابيب ملتوية في حزم المبادلين E-1 و E-3، وهو الخيار الأبسط، والأمثل من حيث زمن استرداد رأس المال من بين الخيارات المقترحة.
 - زيادة سطح التبادل الحراري بمقدار 33% بتركيب حزمة أنابيب مع هيكل جديد في كل مبادل.
 - زيادة سطح التبادل الحراري بمقدار 67% بتركيب حزمتين جديدتين في كل مبادل، ويتميز هذا الخيار بارتفاع تكاليف تنفيذه، وبالتالي ارتفاع زمن استرداد رأس المال.
 - زيادة سطح التبادل الحراري بمقدار 100% بتركيب ثلاث حزم جديدة في كل مبادل.
- أظهرت عملية تقييم نتائج تنفيذ المشروع أن التعديلات التي أدخلت على الوحدة قد ساهمت في تحسين مؤشر كفاءة الطاقة من 250% إلى 140%، إضافة إلى الفوائد غير المباشرة الناتجة عن تخفيف العبء الحراري على الفرن، والتي ساعدت على رفع الطاقة الإنتاجية للوحدة، فضلاً عن تحسين الربحية نتيجة تخفيض تكاليف استهلاك الوقود والطاقة الكهربائية.

الفصل الثالث

نظام إدارة الطاقة في صناعة تكرير النفط

يعرف نظام إدارة الطاقة Energy Management System بأنه نهج شامل للتتبع وتحليل وتحسين استخدام الطاقة في جميع أنحاء المنشأة الصناعية، باستخدام أجهزة وبرامج مثل أجهزة الاستشعار والعدادات ولوحة معلومات مركزية لمراقبة استهلاك الطاقة في الوقت الفعلي، فيوفر بيانات دقيقة لتحديد مواطن ضعف الكفاءة، وتمكين استراتيجيات التحكم، والمساعدة في استدامة تحسينات أداء الطاقة مع مرور الوقت. (Clements, P., 2024)

يمثل نظام إدارة الطاقة القاعدة الأساسية التي تنطلق منها برامج تحسين كفاءة الطاقة، وذلك من خلال دوره في تحديد أماكن وفرض خفض استهلاك الطاقة، وبالتالي خفض تكاليف التشغيل التي تعتبر من أكثر العوامل المساعدة على تحسين القدرة التنافسية للشركات والمنشآت الصناعية.

3-1: معايير إدارة الطاقة

انطلقت فكرة إعداد معايير لنظم الإدارة في سبعينيات القرن العشرين، ونشرت أول سلسلة معايير دولية لإدارة الجودة من قبل المنظمة الدولية للتقييس International Standardisation Organisation في مطلع الثمانينيات، وهي سلسلة ISO:9000. وفي مطلع التسعينيات صدرت معايير استرشادية لمختلف نظم الإدارة، كالمعيار البريطاني BS:8800، الخاص بالصحة والسلامة المهنية، أو معيار سلسلة تقييم الصحة والسلامة المهنية OHSAS:18001، ومعيار الإدارة البيئية ISO:14001، ومعايير السلامة المهنية وحماية البيئة التي أصدرها معهد البترول الأمريكي API:9100A، و API:9100 Bg (Samuel, D., 2022)

ظهر مفهوم إدارة الطاقة من خلال إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة، والتي تميزت بتقليل الاستهلاك، ثم تطور لاحقاً إلى مفهوم كفاءة الطاقة، والذي يعني خفض كمية الطاقة اللازمة لتقديم الخدمات نفسها. بعد ذلك تطور معيار إدارة الطاقة عبر ست مراحل على النحو التالي:

- المرحلة الأولى: 1973 - 1981: مرحلة ترشيد استهلاك الطاقة.
- المرحلة الثانية: 1981 - 1993: مرحلة إدارة الطاقة.
- المرحلة الثالثة: 1993-2000: مرحلة توفير الطاقة
- المرحلة الرابعة: 2000-2010: مرحلة خفض انبعاثات الكربون
- المرحلة الخامسة: 2010-2020: مرحلة كفاءة الطاقة
- المرحلة السادسة: 2020 - حتى الآن: المرحلة الحالية والتوقعات المستقبلية

2-3: معيار إدارة الطاقة ISO:50001

أصدرت المنظمة الدولية للتقييس ISO في عام 2011 معياراً خاصاً لإدارة الطاقة ISO:50001:2011. وهو نسخة معدلة وبديلة عن معيار إدارة الطاقة الأوروبي EN 16001:2010، وذلك لمساعدة المنشآت الصناعية على مواجهة التعقيدات، وتسهيل تنفيذ إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها بأقل التكاليف الممكنة، علاوة على تنظيم إجراءات التحسين وجعلها جزءاً من الأعمال الاعتيادية في المنشأة. (Almanza, F., & Santos, G., 2025)

بعد أن أصدرت المنظمة الدولية للمعايير (ISO) معيار ISO 50001، في عام 2011 قامت بتعديله في عام 2018. ينقسم معيار ISO 50001 إلى عشرة أقسام:

1. **النطاق:** عرض المعيار ومجال تطبيقه، أي المؤسسات من أي حجم أو قطاع أو موقع؛
2. **المراجع المعيارية:** عرض المراجع؛
3. **المصطلحات والتعريفات:** تعريف المصطلحات الرئيسية المستخدمة في المعيار؛
4. **سياق المؤسسة:** يتناول توصيف المؤسسة، وتحديد الأطراف المعنية، وتحديد نطاق نظام إدارة الطاقة وحدوده؛
5. **القيادة:** عرض ضرورة التزام الإدارة العليا بنظام إدارة الطاقة، وتحديد سياسة الطاقة، وأدوار ومسؤوليات أعضاء فريق إدارة الطاقة؛
6. **التخطيط:** يتناول تحديد المخاطر والفرص لتحقيق الأهداف والغايات المحددة مسبقاً. يجب تنفيذ مهام مثل مراجعة استهلاك الطاقة، وتحديد مؤشرات الأداء، ووضع خط الأساس للطاقة في المؤسسة، بالإضافة إلى التخطيط لجمع بيانات الطاقة وإعداد خطط العمل لتحقيق الأهداف.
7. **الدعم:** يصف الدعم الذي يجب أن يحظى به نظام إدارة الطاقة في المؤسسة من خلال الموارد اللازمة للحفاظ على الإدارة وتحسينها. ويشمل ذلك تحديد الكفاءات وتوفير التدريب للموظفين المعنيين، بالإضافة إلى إيصال النتائج ونشر الوعي بين جميع المعنيين.
8. **التشغيل:** يتناول تخطيط ومراقبة العمليات والإجراءات المتعلقة باستخدام الطاقة، وتطوير المشاريع، وشراء السلع والخدمات الموفرة للطاقة.
9. **تقييم الأداء:** يوضح مستوى أداء الطاقة في المؤسسة، من خلال المراقبة والقياس والتحليل.
10. **التحسين:** يقدم توصيات بشأن تصحيح نظام إدارة الطاقة وتحسينه المستمر.

يبين الشكل 3-1 العناصر الأساسية لمعيار إدارة الطاقة ISO:50001.

يحتوي معيار إدارة الطاقة ISO:50001 على مفاهيم رئيسية ضرورية للتعريف بالمعيار، وهذه المفاهيم ليست غريبة عن المفاهيم التي تحتويها معايير الإدارة الأخرى، ولكنها خاصة بمعيار إدارة الطاقة، وأهم هذه المفاهيم ما يلي:

3-2-1: الاستخدام المهم للطاقة Significant Energy Use

يعرف مصطلح "الاستخدام المهم للطاقة" في معيار إدارة الطاقة على أنه يؤشر إلى الأماكن التي يكون فيها استهلاك الطاقة كبيراً وتشكل فرصاً محتملة لتطبيق إجراءات خفض الاستهلاك، أو تحسين كفاءة الطاقة. ويتوقف تحديد مدى أهمية الموقع على ظروف المنشأة وطبيعة عملها.

الشكل (3-1): العناصر الأساسية لمعيار إدارة الطاقة ISO:50001



المصدر: Damasceno, A., et al., 2024

3-2-2: الأداء المرجعي للطاقة Energy Baseline

يحدد الأداء المرجعي للطاقة من قبل المنظمة، ويعبر عن المتغيرات التي تؤثر على معدلات استهلاك الطاقة في فترة زمنية محددة، كدرجة حرارة الطقس، وفصول السنة، ودورة نشاط الأعمال، أو أية ظروف أخرى. تقوم المنظمة بتقييم أدائها في مجال ترشيد استهلاك الطاقة مقارنة بتلك القيم التي تم الحصول عليها أثناء فترة الأداء المرجعي.

3-2-3: مؤشرات أداء الطاقة

تقوم المنظمات بمراقبة التغير في مؤشرات أداء الطاقة Energy Performance Indicators مقارنة بمستوى الأداء المرجعي، بهدف رصد وقياس مدى تقدم عملية التحسين المستمر في كفاءة الطاقة. ويمكن للمنظمة أن تستخدم أكثر من نوع من أنواع مؤشرات قياس الأداء، تبعاً لظروفها الخاصة، مثل مؤشرات الإنتاج، أو ظروف العمليات، أو دورة نشاط الأعمال.

3-3: تكامل معيار إدارة الطاقة مع نظم الإدارة الأخرى

صمم معيار إدارة الطاقة ISO:50001 بهيكلية تسهل التكامل مع معايير الإدارة الأخرى، كمعيار نظام إدارة الجودة ISO:9001، ومعيار نظام الإدارة البيئية ISO:14001، حيث أن كافة هذه المعايير تعتمد على مبدأ التخطيط، والتنفيذ، والاختبار، والمراقبة، ثم التحسين المستمر. كما تشير البيانات الإحصائية إلى أن معظم المنشآت الصناعية التي حصلت على شهادة تطبيق إدارة الطاقة ISO:50001 كانت قد التزمت بمتطلبات معيار الإدارة البيئية ISO:14001 (Marimo, F., & Casadesus, M., 2017)

تتركز مجالات التكامل بين نظم الإدارة في تحديد الأهداف والمسؤوليات والعناصر التشغيلية كوصف الأعمال وعمليات تنفيذ عناصر نظام الإدارة. كما يشترك في تنفيذ نظم الإدارة كافة إدارات المؤسسة بإشراف الإدارة العليا. يبين الشكل 3-2 تكامل معيار إدارة الطاقة مع معايير الإدارة الأخرى.

3-4: مراحل تطبيق نظام إدارة الطاقة

ينطلق مشروع تطبيق نظام إدارة الطاقة باتخاذ كافة الإجراءات التي يمكن من خلالها بلورة التزام العاملين في المصفاة بعملية التحسين المستمر، ثم تتبعها عملية إعداد خطة استراتيجية تتكون من عدة خطوات تبدأ بتقييم مستوى الأداء الراهن وتحديد فرص تحسين كفاءة استهلاك الطاقة، والتي تعتبر المنصة التي تنطلق منها مرحلة إعداد وتنفيذ خطة العمل، ثم تأتي مرحلة التقييم المستمر لعملية التنفيذ، وذلك لمتابعة تقييم نتائج تقدم الأداء مقارنة بالقيم التي كانت عليه قبل بدء التنفيذ، والكشف عن مواطن الضعف ونقاط الانحراف عن الخطة المرسومة وتحليل أسبابها، وإعداد الحلول المناسبة لتجنب تكرارها. يبين الشكل 3-3 مراحل تطبيق نظام إدارة الطاقة.

الشكل (3-2): تكامل معيار إدارة الطاقة مع معايير الإدارة الأخرى



المصدر: Fuchs, H., et al., 2023

3-4-1: تحديد المسؤوليات والسياسات

يتولى الإشراف على نظام إدارة الطاقة فريق عمل تمثل فيه كافة المستويات الإدارية المعنية في المصفاة، وذلك حتى يدرك الجميع أهمية مشروع تحسين كفاءة الطاقة ونتائجه الإيجابية. ولتحقيق هذه الغاية على الوجه الأكمل يجب التأكيد على ضرورة إخضاع العاملين في الوحدات الإنتاجية لدورات تدريبية لتحسين المهارات التي تعزز إدراكهم بممارسات تحسين كفاءة الطاقة.

الشكل (3-3): مراحل تنفيذ نظام إدارة الطاقة



المصدر: Almanza, F., & Santos, G., 2025

يتكون الهيكل التنظيمي لفريق العمل من رئيس يتولى الإشراف، إضافة إلى المجموعات التالية:

- مجموعة مهندسي التشغيل، تقوم بتحديد المشكلات التي تعاني منها الوحدات الإنتاجية واختيار الفرص المناسبة لتحسين كفاءة استهلاك الطاقة.
- مجموعة من المهندسين والفنيين يتولون تحويل التحسينات التي تطرأ على عمليات المصفاة إلى مكاسب اقتصادية.
- مجموعة من المختصين بأجهزة التحكم والبنى التحتية، تقوم بتأمين المعلومات المتعلقة بالوضع الحالي والخطط المستقبلية.
- ممثل إدارة المصفاة، ويتولى مهام تصديق النتائج وإعداد تقرير دوري عن تقدم العمل في مراحل المشروع إلى الإدارة العليا.
- مستشارون خارجيون، لتقديم نصائح حول آخر التطورات المتعلقة بتقنيات تحسين أداء نظم الطاقة في مصافي النفط.

يختلف الهيكل التنظيمي لفريق عمل الإشراف على برنامج إدارة الطاقة في مصفاة تكرير النفط من منطقة لأخرى تبعاً لعوامل عديدة تتعلق بحجم وتعقيد المصفاة، ونوع الوحدات الإنتاجية والخدمية.

تتولى الإدارة العليا للمصفاة، في إطار تنفيذ نظام إدارة الطاقة، القيام بالمسؤوليات التالية:

- تحديد سياسات تحسين كفاءة الطاقة والعمل على المحافظة على استمرار تطبيق هذه السياسات في كافة مواقع المصفاة.
- ضمان توفر الموارد اللازمة للمحافظة على استمرار نتائج تنفيذ نظام إدارة الطاقة.
- تعيين ممثل الإدارة في فريق عمل تنفيذ نظام إدارة الطاقة ومنحه الصلاحيات الكافية التي تمكنه من اتخاذ القرارات اللازمة لتنفيذ المشروع.

أما مسؤوليات ممثل الإدارة فتتركز في رفع تقارير دورية إلى الإدارة العليا لإطلاعها على تقدم العمل والنتائج والإنجازات التي تم تحقيقها، مع مراعاة ما يلي: (Almanza, F., & Santos, G., 2025)

- إعداد مقاييس سهلة الاستخدام والقراءة، يمكن من خلالها قياس الأداء، كأن يحسب معدل التقدم في توفير استهلاك الطاقة بالوحدات الحرارية بدلاً من القيم المالية، حيث أن أسعار الطاقة متغيرة بشكل دائم، بينما كمية الطاقة ثابتة.
- التأكيد على أهمية نشر هذه المقاييس إلى كافة المعنيين بالبرنامج، وإيصال رسائل واضحة إليهم بأهمية الإجراءات المتخذة في تحقيق الأهداف المرسومة.
- وضوح عمليات حساب مقدار التوفير بحيث يسهل فهمها من قبل الجميع.
- مشاركة الجمهور في البرنامج من خلال عقد اللقاءات والندوات المفتوحة لشرح الأهداف والفوائد المتوقعة من تطبيق البرنامج.

3-4-2: صياغة سياسة الطاقة

يشير معيار إدارة الطاقة ISO:50001 إلى أن نقطة البداية في تطبيق مشروع نظام إدارة الطاقة يجب أن تنطلق من صياغة السياسة التي ستتبعها الشركة في إدارة الطاقة، والتي تتضمن الأهداف التي تسعى الإدارة العليا للمصفاة أن تحققها من تطبيق نظام إدارة الطاقة، ويجب أن توثق هذه السياسة

على شكل بيان مطبوع على نسخة ورقية ويوزع على كافة الأشخاص والأقسام والدوائر ذات العلاقة بمشروع إدارة الطاقة. (EMAS, 2012)

يجب أن يحتوي بيان سياسة الطاقة على التعليمات والإرشادات المتعلقة باستهلاك الطاقة، كمبادئ عمليات التشغيل، والأهداف البعيدة المدى للشركة، والتي ستستخدم كمقياس لمدى نجاح إدارة الطاقة. كما يجب أن يتضمن البيان التأكيد على التزام الإدارة العليا بتحسين كفاءة الطاقة في الشركة، والمحافظة عليها بشكل متواصل، وعزمها على تأمين كافة الموارد والمعلومات اللازمة لتحقيق هذه الغاية، كما يجب أن يتضمن البيان إقراراً واضحاً بالتزام الإدارة العليا بمتطلبات كافة التشريعات الخاصة بترشيد استهلاك الطاقة أو التشريعات الأخرى المتعلقة بنشاط الشركة كالتشريعات البيئية. ويبين الشكل 3-4 نموذجاً لبيان سياسة الطاقة لمصفاة تكرير النفط.

3-4-3: تقييم الأداء الحالي لاستهلاك الطاقة

يتم في هذه المرحلة تقييم الأداء الراهن للمصفاة، من خلال مراجعة بيانات الطاقة، وإجراء المقارنة المرجعية Benchmarking التي تعتمد على تقييم مستويات الاستهلاك مقارنة بالمصافي العالمية المماثلة، وذلك بهدف تأمين البيانات اللازمة لعملية صياغة الأهداف المرجوة من تطبيق برنامج التحسين.

يقوم فريق العمل في هذه المرحلة بدراسة وتحديد الأهداف العامة المرجوة من تطبيق البرنامج من خلال الإجابة على بعض الأسئلة، وأهمها:

- ما هو مستوى أداء المصفاة في تطبيق برنامج ترشيد الطاقة مقارنة بالمصافي الأخرى المماثلة؟
- ما هي الفرص الأكثر ملائمة لواقع وظروف المصفاة؟
- كيف يمكن تقييم تلك الفرص وترتيبها حسب الأولوية؟
- ما هي الأهداف التي يمكن تحقيقها والتحسينات التي يمكن تنفيذها؟
- كيف يمكن تصنيف وتجميع كافة الفرص في إستراتيجية متماسكة، ضمن خطة مناسبة، في جدول زمني مناسب للتنفيذ؟
- ما هي الموارد اللازمة لتنفيذ الفرص؟

تهدف عملية توصيف مستوى الأداء الراهن للمصفاة إلى الكشف عن نقاط الضعف التي تسبب زيادة استهلاك الطاقة، والبحث عن الفرص التي يمكن اغتنامها لتحسين كفاءة الاستهلاك، وتحديد مقدار التوفير المتوقع من تنفيذها، إضافة إلى دراسة وتحديد الأهداف التي تسعى إلى تحقيقها نتيجة تطبيق البرنامج، وذلك من خلال الخطوات التالية:

- تجميع البيانات المتعلقة بالنظم القائمة والوضع التشغيلي الحالي.
- مقابلة مع المشغلين لمناقشة النقاط والمواقع التي تعاني من مشكلات في استخدام الطاقة.
- تقييم اقتصاديات الطاقة في المصفاة، بهدف معرفة أماكن الاستهلاك وتكاليف تشغيلها.

الشكل (3-4): نموذج بيان سياسة الطاقة لمصفاة تكرير النفط



المصدر: EMAS, 2012

لتقييم مستوى الأداء الفعلي لوحدات المصفاة واستقرار نقاط الضعف التي تؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة عن القيم المعتمدة في المعايير العالمية يقوم فريق العمل المكلف بإدارة البرنامج بإجراء تجارب اختبار لظروف التشغيل Test run، ودراسة موازنة الطاقة في المصفاة Refinery Energy Balance التي تتكون من حساب الكميات الداخلة والخارجة لشبكات بخار الماء والوقود والكهرباء.

تساهم تجارب اختبار ظروف التشغيل ودراسة موازنة الطاقة في تحديد مواقع انحراف ظروف التشغيل عن القيم التصميمية في وحدات المصفاة، وبالتالي يمكن تحديد مواطن الخلل وأسبابها واتخاذ الإجراءات المناسبة لمعالجتها، إضافة إلى إظهار طبيعة الانعكاسات التي تحدثها إجراءات التحسين المتخذة على الأجزاء الأخرى للمصفاة، فعلى سبيل المثال، إذا لم يتم حصر وتحديد كافة الفروع المرتبطة بشبكة بخار الماء في المصفاة بشكل كامل، لا يمكن التأكد من أن مشروع تعديل تحسين التبادل الحراري لزيادة إنتاج البخار من الحرارة العادمة في منطقة ما من وحدات المصفاة لن يؤدي إلى حدوث فائض في البخار في منطقة أخرى قد تستوجب طرحه إلى الجو، مما يجعل الفائدة من إجراء التعديل معدومة. كما أنه لا يمكن معرفة مدى تأثير شبكة الوقود في المصفاة عند توقف أحد مراحل إنتاج البخار عن العمل بغية توفير استهلاك الوقود إذا لم يكن لدينا معرفة شاملة بشبكات بخار الماء الرئيسية وتفرعاتها.

يجب أن تشتمل البيانات على كل ما يتعلق بمعدلات الاستهلاك ونسب التوفير التي نتجت عن تطبيق المشاريع السابقة لترشيح الاستهلاك. ولتسهيل متابعة تطورات أداء استهلاك الطاقة يفضل فصل البيانات تبعاً لنوع الطاقة المستهلكة، كبخار الماء والوقود والطاقة الكهربائية. يبين الشكل 3-5 نموذجاً لأهم البيانات التي يجب تجميعها لمشروع تحسين كفاءة الطاقة (Almanza, F., & Santos, G., 2025)

من الأمثلة التي توضح فوائد دراسة موازنة الطاقة في المصفاة عملية اختيار نوع الآلات الدوارة (ضواغط، ومضخات، ونوافخ...) التي ستستخدم في المشاريع المستقبلية لتوسيع الوحدات الإنتاجية، حيث يمكن تحديد فيما إذا كانت ستدار بواسطة عنفة بخارية أو بمحرك كهربائي، وذلك من خلال معرفة مدى توفر الفائض من بخار الماء أو الطاقة الكهربائية في شبكات المصفاة.

عند إعداد موازنة وقود المصفاة تقاس كافة كميات الوقود المستهلكة على عدادات القياس المركبة على مدخل كل فرن، كما تقاس كمية الوقود المنتجة من الوحدات الإنتاجية على الخطوط الخارجة من كل مصدر من مصادر الإنتاج، كما تحدد نسب مكونات الوقود الغازي من خلال نتائج تحليل العينات يدوياً أو باستخدام أجهزة التحليل المستمر المركبة على الخطوط Online Analysers.

ولتعظيم الاستفادة من البيانات، واختصار الوقت في إعداد الجداول تستخدم قاعدة بيانات تعتمد على أحدث التقنيات الحاسوبية، ويراعى في تصميمها تحقيق الشروط التالية:

- سهولة رفع البيانات التي يتم الحصول عليها من الوحدات
- وضوح شكل مدخلات البيانات ما أمكن
- التأكد من أن كل رقم في قاعدة البيانات موضح بوحدة القياس المناسبة.
- تأمين إمكانية تحويل وحدات القياس إلى أكثر من نوع حتى يتمكن المستخدم من اختيار ما يناسبه
- تضمين قاعدة البيانات أدوات مساعدة لتسهيل عملية إعداد التقارير
- تحديد مواعيد تجميع البيانات وإعداد التقارير هل هي يومية أو أسبوعية أو شهرية
- تأمين أدوات تحليل البيانات، كالجداول والمخططات البيانية

الشكل (3-5): نموذج البيانات المطلوبة لمشروع تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة تكرير النفط



المصدر: Almanza, F., & Santos, G., 2025

3-4-4: تحديد فرص تحسين كفاءة الطاقة

بعد الحصول على المخططات والبيانات التي تظهر الوضع الراهن لموازنة الطاقة في وحدات المصفاة يتم تحديد الفجوة بين الواقع الحالي والقيم المبينة في المعايير المعتمدة عالمياً لمصافي مماثلة، أو ما يسمى بالمقارنة المرجعية Benchmarking، وذلك بغية تحديد الاختناقات والنقاط التي تزيد فيها معدلات استهلاك الطاقة عن القيم المقبولة. وهذه الاختناقات تعتبر بالتالي فرصاً يمكن تنفيذها لتحسين كفاءة استخدام الطاقة في المصفاة. ثم تصنف هذه الفرص تبعاً لأهميتها من حيث العائد الاقتصادي وتكاليف التنفيذ إلى فرص قريبة المدى وأخرى بعيدة المدى، وذلك في إطار التمهيد لمرحلة التنفيذ. وفيما يلي بعض الأمثلة للفرص التي يمكن تنفيذها في مصفاة تكرير النفط على المدينين القريب والبعيد.

• فرص المدى القريب

تعرف فرص المدى القريب بأنها إجراءات فورية للحد من هدر الطاقة يمكن تنفيذها خلال مدة زمنية قصيرة وباستثمارات محدودة. وقد أثبتت الخبرة العملية لتنفيذ مشاريع مشابهة في بعض مصافي النفط إمكانية تخفيض ما يعادل 10-15% من كمية الطاقة المستهلكة، ومن أهم الأمثلة على هذه الإجراءات:

- إعداد برنامج المراقبة المستمرة لظروف عمل المعدات المستهلكة للطاقة، وتحديد العوامل المسببة للهدر بشكل آني، واتخاذ الإجراءات التصحيحية الفورية.
- استخدام تقنيات الأتمتة الشاملة التي تساعد المشغل على الكشف الفوري عن أي خلل يحدث في ظروف التشغيل، ليقوم بتصحيحه قبل تفاقمه، وبالتالي يمكن ضمان استقرار عمل الوحدات، وتخفيض التوقفات الطارئة التي تسبب هدر الطاقة وطرح كمية كبيرة من المواد الهيدروكربونية إلى شبكات تجميع النفايات، وإلى الهواء الجوي، أو الحرق في الشعلة، والتي تسبب تلويث البيئة، فضلاً عن الخسارة الناتجة عن خروج مواصفات المنتجات عن القيم النظامية، حيث تحتاج بعدها إلى كمية كبيرة من الطاقة لإعادة تكريرها.
- الاهتمام بتنفيذ برامج الصيانة الدورية والوقائية للوحدات الإنتاجية، بالشكل الذي يضمن استمرار عمل المعدات وسلامتها.
- تحسين التكامل الحراري في الوحدات الإنتاجية للاستفادة من الحرارة الضائعة، والبحث عن إمكانية تحويل اللقيم من الوحدات الرئيسية مباشرة إلى الوحدات اللاحقة دون تجميعه في خزانات وسطية، فيمكن بذلك توفير كمية الطاقة اللازمة لإعادة تسخين اللقيم مرة أخرى بعد أن تم تبريده بعد خروجه من الوحدات الرئيسية ليصبح قابلاً للتخزين.
- تطبيق برامج مراقبة ظاهرة الانسداد بالرواسب Fouling في المبادلات الحرارية، التي تساعد على الكشف عن حدوث تدني في معدل انتقال الحرارة، وبالتالي إتاحة الفرصة لاتخاذ الإجراءات التصحيحية قبل تفاقم المشكلة.
- إصلاح نقاط فقد الطاقة في الأنابيب والأوعية والأفران كترميم مواد العزل الحراري التالفة، وتعديل مسارات الأنابيب ما أمكن لإزالة الزوايا الحادة التي تعيق جريان السائل وبالتالي تسبب ارتفاع كمية الطاقة اللازمة لضخه.

- استعمال مبادلات حرارية ذات تصميم متطور يؤمن سطح تبادل حراري أكبر ومردود أفضل.
- تدريب المهندسين على نظم نمذجة العمليات التكنولوجية Process Modeling Systems باستخدام برمجيات خاصة لاختيار أفضل الظروف المناسبة لتحسين مردود وأداء الوحدات الإنتاجية.
- الاستفادة من التطورات الحديثة في مجال استخدام المحفزات، كتلك المستخدمة في وحدات نزع الكبريت من المنتجات البترولية بالهيدروجين، والتي يمكن بواسطتها الحصول على مردود أعلى عند درجة حرارة تفاعل مماثلة.
- استخدام أجهزة التحليل المستمر المركبة على خطوط أنابيب عمليات الإنتاج On Stream Continuous Analyzer تمكن المشغل من الحصول على قيم آنية لتحاليل المنتجات، وبالتالي إتاحة إمكانية تصحيح الخلل فور حدوثه، واختصار زمن انتظار نتائج التحليل من المخبر.
- المراقبة الدائمة لأداء الأفران ومولدات البخار بشكل دوري، وتحليل أسباب الانحراف والبحث عن الحلول الممكنة.

• فرص المدى البعيد

تختلف فرص المدى البعيد في أن تنفيذها يحتاج إلى استثمارات كبيرة ومدة زمنية طويلة، لأنها تتعلق بإجراء تعديلات شاملة على البنية الأساسية لمعدات المصفاة أو الوحدات الإنتاجية، ومن أهم الأمثلة على هذه الإجراءات:

- تركيب مبادلات حرارية أو تبديل المبادلات القائمة لتحسين التكامل الحراري بين الوحدات الإنتاجية والخدمية، بحيث يستفاد من حرارة بعض الخطوط المطلوب تبريدها في تسخين خطوط وحدات أخرى.
- الاعتماد على تقنيات الوحدات التحويلية Bottom of the Barrel لإنتاج المشتقات الخفيفة، التي تستهلك طاقة أقل من وحدات التقطير الجوي التي تكرر النفط الخام، وفي نفس الوقت تزيد من نسبة إنتاج المشتقات الخفيفة المرغوبة.
- اعتماد تقنية التوليد المشترك Co-generation لتوليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء في المصفاة، حيث يمكن تصريف المنتجات الجانبية الفائضة والرخيصة الثمن، مثل فحم الكوك والقار، في توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتلبية حاجة المصفاة وبيع الفائض إلى الشبكة العامة.
- الاعتماد على التقنيات التي لا تحتاج إلى طاقة حرارية، فمثلاً تحتاج عملية حرق المخلفات Incineration الناتجة عن وحدة معالجة المياه الملوثة في المصفاة إلى كمية كبيرة من الطاقة مقارنة بطرق المعالجة الأخرى، كطريقة التثبيت الكيميائي أو الدفن في التربة.
- إعادة تصميم الوحدات الإنتاجية لتزويدها بالمرونة اللازمة لتكرير خامات مختلفة الخصائص، دون أن ينتج عنها توضع الرواسب على سطوح الأوعية والمبادلات الحرارية والتي تسبب هدراً كبيراً للطاقة.

3-4-4: إعداد مؤشرات الأداء الرئيسية

تستخدم مؤشرات الأداء لقياس كفاءة الطاقة في العمليات الصناعية، ومراقبة تطورها وتساعد على تحليل أسباب التغير واقتراح الحلول المناسبة. كما تساهم في قياس مدى التقدم في إنجاز برامج تحسين كفاءة الطاقة، وتقييم المردود الاقتصادي والتقني الذي يمكن الحصول عليه نتيجة التنفيذ.

إن تحديد مؤشرات قياس كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط عملية صعبة ومعقدة، وذلك نظراً للتباين الكبير بين خصائص وظروف عمل مصافي النفط، حيث أن لكل مصفاة ظروفها الخاصة المؤثرة

على درجة أدائها، كمتطلبات السوق الذي تصدر له منتجاتها، ومدى صرامة التشريعات البيئية في المنطقة التي تعمل بها، ونوع النفط الخام المكرر والقائم الأخرى المستخدمة، ودرجة جودة المنتجات النهائية.

عند البدء بعملية إعداد مؤشرات الأداء الرئيسية يجب تحديد كيفية استخدامها، وما هي الجهة التي سترسل إليها نتائج القياس، كما يجب تصنيف أداء الوحدات الإنتاجية وعمليات الإنتاج والمعدات حسب كفاءتها، وذلك من خلال الإجابة على الأسئلة التالية: (Ebinger, M., Scheyhing, J. 2024)

- ماهي الوحدات الإنتاجية التي تستهلك الطاقة بطريقة أكثر كفاءة؟
- ماهي عمليات الإنتاج الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة؟
- ماهي أفضل ظروف التشغيل التي تتميز بكفاءة طاقة أعلى.
- هل أداء عمليات الإنتاج، والصيانة، وعمليات استبدال المعدات القديمة، في تحسن مستمر.

ولتنفيذ عملية إعداد مؤشرات الأداء الرئيسية بطريقة اقتصادية ومضمونة بأقل التكاليف الممكنة يجب مراجعة مؤشرات القياس التي كانت تستخدم سابقاً والتأكد من مدى موثوقية البيانات التي تم الحصول عليها، وبالتالي يمكن الاستفادة منها والبناء عليها.

• أهداف مؤشرات قياس أداء كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط

لمؤشرات قياس كفاءة الطاقة في مصافي تكرير النفط أهمية كبيرة في نجاح تطبيق نظام إدارة الطاقة، والارتقاء بأداء المصفاة إلى المستويات المعيارية، وأهم هذه الأهداف:

- قياس كفاءة استخدام الطاقة في وحدات المصفاة بشكل دوري.
- كشف الانحرافات التشغيلية مبكراً.
- دعم اتخاذ القرار لتحسين الأداء وخفض الفاقد.
- ربط مؤشرات الطاقة بالأداء التشغيلي والإنتاجي والاقتصادي.
- توفير أساس عملي لتطبيق نظام إدارة الطاقة داخل المصفاة.

• الإطار العام لمؤشرات قياس الأداء

تصنف مؤشرات الأداء في خمسة محاور رئيسية: يبين الشكل 3-6 الإطار العام لمؤشرات قياس كفاءة الطاقة في مصفاة تكرير النفط.

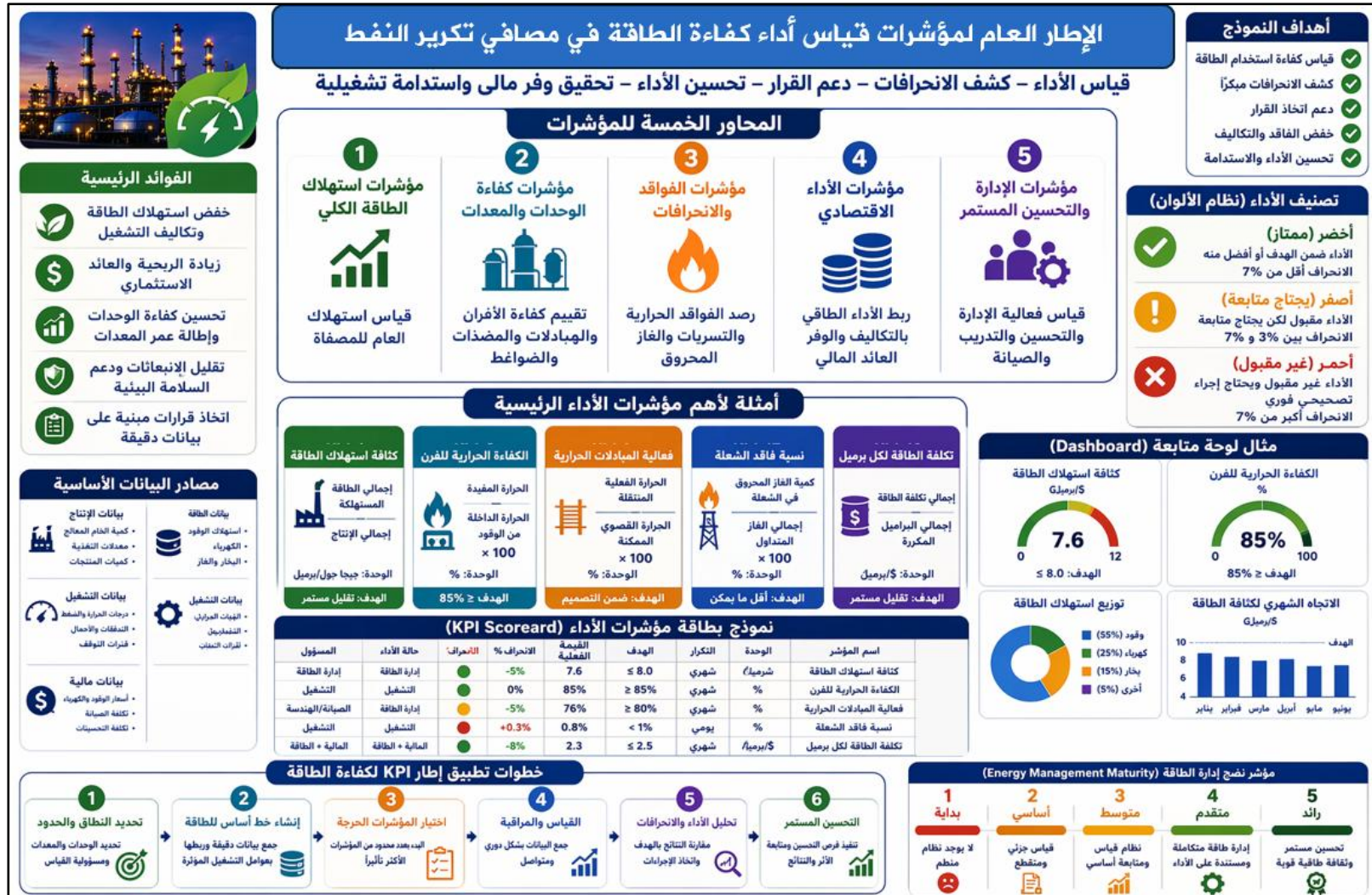
المحور الأول: مؤشرات استهلاك الطاقة الكلي: وهي المؤشرات التي تقيس معدل استهلاك الطاقة في الوحدات وفي المصفاة بشكل عام وتساعد في رصد التغيرات خلال فترات زمنية محددة، إضافة إلى المقارنة مع مصاف أخرى مماثلة، ومنها ما يلي:

1. مؤشرات لقياس كثافة استهلاك الطاقة للمصفاة، أو كمية الطاقة المستهلكة لكل وحدة إنتاج. وتقاس بجيجا جول/برميل مكرر، أو مليون وحدة حرارية بريطانية/برميل. ويحسب بالمعادلة:

$$\text{كثافة استهلاك الطاقة} = \text{إجمالي الطاقة المستهلكة} / \text{إجمالي الإنتاج}$$

يستفاد من هذا المؤشر في قياس الكفاءة العامة للمصفاة، والمقارنة بين الفترات الزمنية أو بين المصافي، وعند انخفاض قيمة المؤشر فهذا يشير إلى تحسن الكفاءة، أما القيمة المرتفعة فتشير إلى أن استهلاك الطاقة أعلى من المطلوب.

الشكل (3-6): الإطار العام لمؤشرات قياس كفاءة الطاقة في مصفاة تكرير النفط



المصدر: Ebinger, M., Scheyhing, J. 2024:

2. مؤشر استهلاك الوقود الداخلي كنسبة من الخام المعالج، يشير إلى قياس ما تستهلكه المصفاة من منتجاتها كوقود لتشغيل وحداتها، ويحسب بالمعادلة:

استهلاك الوقود الداخلي (%) = (كمية الوقود المستهلك داخل المصفاة / كمية الخام المكرر) $\times 100$

3. مؤشر استهلاك الكهرباء النوعي، يستخدم لقياس كمية الكهرباء المستهلكة في المصفاة لكل برميل وتقاس بالوحدة (ك.و.س./برميل)، وتكمن أهميته في الوحدات التي تحتوي عدد كبير من الضواغط والمضخات والمحركات، أو التي تطبق تقنية التسخين بالمسخنات الكهربائية، ويحسب بالمعادلة:

الاستهلاك النوعي للكهرباء = إجمالي الكهرباء المستهلكة / إجمالي الإنتاج

4. استهلاك البخار النوعي، يوضح عبء الأحمال الحرارية ومدى كفاءة الاستفادة من البخار، ويحسب بالمعادلة:

استهلاك البخار النوعي = إجمالي البخار المستهلك / إجمالي الإنتاج

المحور الثاني: مؤشرات كفاءة الوحدات والمعدات

1. مؤشر الكفاءة الحرارية للفرن، ويستخدم لتقييم درجة حرارة غاز مداخل الأفران ونسبة الأكسجين في غاز المداخل، ومقدار فقد الحرارة مع المداخل، وحالة العزل الحراري في الأفران، التي تعتبر من أكبر مستهلكي الطاقة في المصفاة، ويحسب بالمعادلة:

الكفاءة الحرارية = (الحرارة المفيدة الممتصة بواسطة السائل / الحرارة الداخلة من الوقود) $\times 100$

2. فاقد الحرارة عبر غاز المداخل، يدل على جودة احتراق الوقود في الفرن، فإذا ارتفع المؤشر فهذا يشير إلى سوء ضبط الاحتراق أو عدم كفاية استرجاع الحرارة، ويحسب بالمعادلة:

فاقد الحرارة عبر المداخل = الحرارة الخارجة مع غاز المداخل / الحرارة الكلية للوقود

3. مؤشر فعالية المبادلات الحرارية، يستخدم لقياس كفاءة استرجاع الحرارة، وكشف تراكم الترسبات داخل المبادلات، ويحسب بالمعادلة:

مؤشر فعالية المبادل = الحرارة الفعلية المنتقلة / الحرارة القصوى الممكنة

4. مؤشر نسبة استرجاع الحرارة في شبكة التبادل الحراري، وهو مؤشر استراتيجي لتحسين التكامل الحراري وتقليل الحمل على الأفران، ويحسب بالمعادلة:

نسبة استرجاع الحرارة = الحرارة المسترجعة / إجمالي الاحتياج الحراري $\times 100$

5. كفاءة المضخات والضواغط، يحسب بالمعادلة:

كفاءة المضخة = القدرة الهيدروليكية المفيدة / القدرة الكهربائية الداخلة $\times 100$

6. كثافة استهلاك الكهرباء في أنظمة الضخ، يحسب بالمعادلة:

كهرباء الضخ النوعية = استهلاك الكهرباء للمضخات / كمية السائل المنقول

المحور الثالث: مؤشرات الفواقد والانحرافات

1. نسبة فاقد الشعلة (Flaring Losses) ، يستخدم لقياس هدر الطاقة المرتبط بمنظومة الشعلة،
ويحسب بالمعادلة:

نسبة فاقد الشعلة = كمية الغاز المحروق في الشعلة / إجمالي الغاز المنتج أو المتداول $\times 100$

2. فاقد البخار: يهدف إلى الكشف عن التسربات، وجودة عمل المصائد البخارية، وأماكن نقص العزل الحراري، وحالات التنفيس غير المبرر.

فاقد البخار = (البخار المنتج - البخار المستخدم فعلياً بشكل مفيد) / البخار المنتج $\times 100$

3. نسبة التسربات الحرارية: يعبر عن مقدار الفقد الحراري الناتج عن وجود قصور في العزل الحراري،
ويحسب بالمعادلة:

نسبة التسربات الحرارية = الطاقة المفقودة عبر العزل أو الأسطح الساخنة / إجمالي الطاقة الحرارية $\times 100$

المحور الرابع: مؤشرات الأداء الاقتصادي، مثل مؤشر تكلفة الطاقة لكل برميل مكرر، ويستخدم لترجمة الأداء الطاقوي إلى تأثير مالي مباشر، ويحسب بالمعادلة:

تكلفة الطاقة لكل برميل = إجمالي تكلفة الوقود + كهرباء + بخار + مرافق / إجمالي البراميل المكررة

المحور الخامس: مؤشرات الإدارة والتحسين المستمر

1. نسبة تغطية القياس والمراقبة، ويعكس مدى جاهزية المصفاة لإدارة الطاقة على أسس صحيحة،
ويحسب بالمعادلة:

نسبة تغطية القياس = عدد نقاط القياس المتاحة والموثوقة / عدد نقاط القياس المطلوبة $\times 100$

2. نسبة تنفيذ فرص التحسين، يستخدم لمتابعة عدد الفرص المنفذة وتقييم أداء عملية تحسين كفاءة الطاقة، ويحسب بالمعادلة:

نسبة التنفيذ = عدد فرص التحسين المنفذة / إجمالي فرص التحسين المعتمدة $\times 100$

• مراحل تطبيق مؤشرات قياس أداء الطاقة داخل المصفاة

المرحلة 1: تحديد الحدود والنطاق، فيما إذا كان القياس على مستوى المصفاة كلها، أم على مستوى الوحدات فقط، أم على مستوى المعدات الحرجة.

المرحلة 2: إنشاء خط أساس للطاقة، والبدء بجمع بيانات 12 شهراً على الأقل إن أمكن، وربط الاستهلاك بعوامل التشغيل من حيث معدل التغذية، ونوع الخام، ومزيج المنتجات، وتشغيل الوحدات المساندة، والظروف الجوية

المرحلة 3: اختيار المؤشرات الحرجة، مثل كثافة استهلاك الطاقة، وكفاءة الأفران، وفعالية المبادلات، وفاقد الشعلة، واستهلاك الكهرباء النوعي، وتكلفة الطاقة لكل برميل.

المرحلة 4: إعداد لوحات متابعة يومية للوحدات الحرجة، وشهرية للإدارة الوسطى، وفصلية للإدارة العليا

المرحلة 5: ربط المؤشرات بالإجراءات كل مؤشر يجب أن يقابله مسؤول متابعة، وإجراء تصحيحي، وموعد إغلاق، والتحقق من أثره.

يبين الشكل 3-7 مراحل تطبيق مؤشرات قياس أداء الطاقة في مصفاة تكرير النفط

الشكل (3-7): مراحل تطبيق مؤشرات قياس أداء الطاقة في المصفاة



المصدر: Carrera, L.A.I., et al. 2026

• عوامل نجاح مؤشرات قياس الأداء

يعتمد نجاح تطبيق مؤشرات قياس الأداء على عوامل عديدة لا بد من مراعاتها حتى تحقق المصفاة النتائج المرجوة من تطبيق نظام إدارة الطاقة، وأهمها:

- البدء بمؤشرات قليلة لكن مؤثرة.
- توحيد منهجية جمع البيانات والتحقق منها.
- اعتماد خط أساس واقعي لكل وحدة.
- عدم الاكتفاء بالقياس فقط، بل ربط كل مؤشر بخطة عمل.
- مراجعة المؤشرات دورياً وتطويرها حسب نضج نظام الطاقة.
- إشراك التشغيل والصيانة والهندسة والطاقة والمالية في نفس الإطار.
- تحويل المؤشرات إلى لوحة قيادة Dashboard سهلة الفهم للإدارة.

3-4-5: تحديد الأهداف المتوقعة من تنفيذ البرنامج

تساهم عملية تحديد الأهداف المتوقعة من تطبيق برنامج إدارة الطاقة في تسليط الضوء على مواطن التحسين، كما أنها تعكس مدى اهتمام الشركة بعملية ترشيد استهلاك الطاقة.

يجب أن تكون الأهداف منطقية وقابلة للتنفيذ وفقاً للإمكانيات المتاحة، وذلك لضمان ثقة العاملين في الشركة، وتعزيز حرصهم على نجاح البرنامج. ومن الشروط الأخرى التي يجب مراعاتها في تحديد

الأهداف أن يشترك في إعدادها كافة العاملين في المصفاة حتى لا يسود اعتقاد لديهم بأنهم مستبعدون من مشروع تحسين كفاءة الطاقة. (Rossiter, P., & Jones, P., 2015)

تختلف الأهداف المتوقعة من تنفيذ برنامج إدارة الطاقة باختلاف ظروف كل مصفاة، والتحديات التي تعترضها، وطبيعة المشكلات التي تعاني منها. فعلى سبيل المثال، إذا كان الاهتمام كبيراً بتحسين الوضع التنافسي للشركة فعندئذ يجب التركيز على الأهداف التي تساهم في ردم الهوة بين الأداء الحالي للشركة وبين مستويات أداء الشركات المنافسة.

3-4-6: مرحلة التنفيذ

تتضمن مرحلة تنفيذ برنامج إدارة الطاقة عدة خطوات تبدأ بإعداد خطة عمل تفصيلية مع جدول زمني لتنفيذ الفرص التي تم اختيارها في مرحلة التخطيط بحيث يمكن تحقيق الأهداف المرسومة. بعد ذلك تأتي خطوات تقييم نتائج تنفيذ العمل واتخاذ الإجراءات اللازمة للمحافظة على استدامة المكاسب التي أمكن الحصول عليها نتيجة تنفيذ البرنامج. وفيما يلي أهم خطوات مرحلة التنفيذ:

• إعداد خطة العمل

تأتي هذه الخطوة بعد اعتماد الفرص الأنسب من بين الخيارات المقترحة، وتتضمن إعداد جدول زمني لتنفيذ كل فرصة من هذه الفرص، وذلك بمشاركة مهندسين متخصصين بتنفيذ الأعمال الهندسية. وأثناء إعداد البرنامج الزمني تصنف أولوية تنفيذ الفرص حسب الأهمية، حيث يفضل البدء بالفرص التي يمكن تنفيذها على المدى القريب والتي لا تحتاج إلى استثمارات باهظة، كتعديل ظروف تشغيل العمليات، أو إدخال تعديلات ميكانيكية بسيطة على معدات التبادل الحراري. كما يتم تحديد المهام التي يمكن تنفيذها اعتماداً على الإمكانيات الذاتية أو تسليمها لشركات إنشائية خارجية متخصصة بأعمال التنفيذ.

• تنفيذ خطة العمل

وهي الخطوة التي يتم خلالها إعداد الإجراءات اللازمة لوضع خطة العمل موضع التنفيذ، وتكلف الإدارة مجموعة من المتخصصين تتولى الإشراف على تنفيذ الأعمال المدرجة في خطة العمل، والتنسيق بين إدارة المصفاة والجهات المنفذة الخارجية.

• متابعة تقدم سير العمل

تهدف هذه الخطوة إلى التأكد من أن عملية تنفيذ خطة العمل تسير وفق الجدول الزمني المخطط، وأن الأعمال يتم تنفيذها وفقاً للشروط المتفق عليها في وثائق التصميم والتعليمات الواردة في خطة العمل، ويجب تحديد برنامج للمراجعة اليومية، والأسبوعية والشهرية والسنوية.

• تقييم النتائج

تتم عملية تقييم النتائج من خلال مقارنة مستوى الأداء الذي وصلت إليه المصفاة بعد تنفيذ خطة العمل بالمستوى الذي كانت عليه قبل بدء تنفيذ المشروع، وإعداد تقارير يومية وأسبوعية وشهرية تتضمن النتائج التي أمكن الحصول عليها مقارنة بالأهداف المرسومة. تهدف هذه الخطوة إلى تقييم الفوائد التي أمكن الحصول عليها، وتحديد مواطن الخلل، والبحث عن الحلول الممكنة لتفادي الثغرات والصعوبات التي واجهت عملية التنفيذ.

• توثيق النتائج

تكتسب عملية توثيق النتائج أهمية بالغة بالنسبة لمتابعة تطور أداء المصفاة في مجال تطبيق برامج تحسين كفاءة الطاقة والعودة إليها في المستقبل، وللتأكد من أن عملية التوثيق تجري بالشكل الصحيح يجب الإجابة على الأسئلة التالية:

- ما هو موضوع الوثيقة؟
- ما هو القسم أو الدائرة التي يتعلق بها موضوع الوثيقة؟
- ما هي الأنشطة التي يجب توثيقها؟
- من هم الأشخاص الذين سترسل لهم الوثيقة؟

3-4-7: التحسين المستمر

يسود أحياناً اعتقاد خاطئ لدى البعض أن مجرد تنفيذ بعض التحسينات على أداء عمليات التكرير في سنوات سابقة يحقق الهدف المنشود، إلا أن التجربة العملية أثبتت أن مؤشر كفاءة الطاقة يمكن أن يتغير مع الزمن، مما يؤكد على ضرورة إجراء مراجعة مستمرة لبرنامج إدارة الطاقة للتأكد من أنه يطبق بالشكل الصحيح. كما تهدف هذه المرحلة إلى المحافظة على الفوائد والمكاسب التي تم تحقيقها نتيجة تنفيذ برنامج ترشيد استهلاك الطاقة، وذلك من خلال تنفيذ الإجراءات التالية:

- إجراء مراجعة دورية لكافة ظروف تشغيل معدات إنتاج واستهلاك الطاقة، وذلك لتقييم مقدار التوفير في الاستهلاك مقارنة بالأهداف المرسومة في خطة البرنامج، فإذا كانت معظم المواقع قد حققت نتائجاً أعلى من القيم المحددة في الأهداف فهذا يمكن أن يؤشر إلى أن الأهداف قد وضعت بقيم أدنى من الواقع والعكس صحيح.
- إعادة تنفيذ مراحل برنامج ترشيد استهلاك الطاقة خلال فترات زمنية متقطعة للبحث عن فرص جديدة لخفض الاستهلاك، حيث أن تنفيذ المشروع للمرة الأولى لا يعني أن كافة الفرص قد تم اغتنامها، بل غالباً ما تظهر لاحقاً فرص جديدة لتحسين كفاءة الطاقة يمكن أن تكون جوهرياً وذات فائدة كبيرة.
- البحث فيما إذا كانت الموارد المتاحة قد تم استثمارها بالشكل الأنسب.
- حساب الأرباح الناتجة عن تطبيق الفرص في كافة المواقع خلال فترة زمنية محددة.
- نشر النتائج ورقياً أو إلكترونياً بحيث يمكن لكافة المشاركين في تنفيذ البرنامج أن يطلعوا عليها ويقدموا ملاحظاتهم، وهي خطوة ضرورية جداً لضمان استدامة النتائج.
- ولتسهيل عملية المراجعة الدورية لنظام إدارة الطاقة أصدرت منظمة التقييس الدولية لمعيار إدارة الطاقة ISO:50001 قائمة تتضمن أهم الأسئلة التي يجب الإجابة عليها أثناء إجراء المراجعة للتأكد من مدى نجاح المنشأة من تطبيق نظام إدارة الطاقة.

3-5: عوامل نجاح تنفيذ معيار إدارة الطاقة

يعتمد نجاح تطبيق معيار إدارة الطاقة على دعم الإدارة العليا، ومدى اهتمام العاملين بأهمية مشروع تحسين كفاءة الطاقة، وحجم المكاسب التي يمكن الحصول عليها. كما يتطلب نجاح تنفيذ معيار

إدارة الطاقة تصافر عدة عوامل تتدرج من إيجاد تشريعات ونظم إدارية تساعد على تعظيم القيمة، وحتى اتخاذ إجراءات التحسين المستمر، وتتلخص هذه العوامل بما يلي: (Shah, R., & Akhtar, R. 2024)

3-5-1: توفر خبرة سابقة في تطبيق نظم الإدارة

من العوامل المساعدة على نجاح تطبيق نظام إدارة الطاقة أن تتوفر للمصفاة خبرة سابقة في تطبيق نظم الإدارة الأخرى، حيث لا تحتاج في هذه الحالة سوى إلى تنفيذ بعض الخطوات الإضافية على النظم السابقة. فعلى سبيل المثال يتشابه نظام إدارة الطاقة مع نظام الإدارة البيئية في كثير من البنود وخطوات التنفيذ، ولا يحتاج تطبيق نظام إدارة الطاقة في هذه الحالة سوى إلى إضافة بعض الجوانب البسيطة إلى نظام الإدارة البيئية.

3-5-2: إعداد هيكل إداري منظم

إن نجاح تنفيذ معيار إدارة الطاقة بالشكل الذي يضمن استدامة النتائج يستوجب وجود قيادة إدارية رشيدة، والتزام تنظيمي، ومحاسبة للأفراد المعنيين بتنفيذ البرنامج. كما أن لمدير برنامج إدارة الطاقة دور مهم في نجاح مشروع تحسين كفاءة الطاقة من خلال تواصله المباشر مع العاملين في المشروع وتشجيعهم على إطلاق المبادرات والمشاركة في الأفكار التي يمكن أن تساهم في تطوير العمل، والتركيز على الإنجازات أكثر من المحاسبة على الأخطاء.

- تسمية رئيس ميداني لكل مجموعة عمل مستقلة يتولى قيادة المجموعة والإشراف على تنفيذ المهام، ويقوم برفع تقارير دورية إلى مدير الموقع
- الاهتمام بالمبادئ الأساسية، والتي تضمن حسن تنفيذ النشاطات، بهدف المحافظة على مستوى الأداء التشغيلي المرتفع بشكل دائم، وذلك من خلال تجويد عمليات تشغيل وحدات المصفاة، وتنفيذ برامج الصيانة الدورية للمعدات.
- إعداد خطط للتحسين المستمر، والعمل على تقييم أداء الوحدات بشكل دائم ودوري، واقتراح استبدال الأجهزة ذات الأداء الضعيف بأخرى متطورة ذات ميزات أعلى من حيث الدقة والكفاءة.
- توثيق نتائج مشاريع تحسين كفاءة الطاقة ونشرها على العاملين للاطلاع عليها ومشاركتهم في عمليات التقييم واقتراح الحلول المناسبة للتحسين المستمر.
- الاهتمام بتدريب العاملين، لرفع قدرتهم على تنفيذ إجراءات تحسين كفاءة الطاقة بدون أخطاء.
- رفع الوعي بأهمية تطبيق برامج إدارة الطاقة بين العاملين في المصفاة والوحدات المساندة، وذلك من خلال توزيع النشرات والصحف في مواقع الشركة على شبكة الإنترنت. ويجب أن تركز هذه النشرات على النواحي التالية:
 - فوائد تحسين كفاءة الطاقة على البيئة والشركة.
 - أهمية الالتزام بسياسة الطاقة التي تنتهجها الشركة.
 - متطلبات ومفاهيم معيار إدارة الطاقة.
 - الانعكاسات المحتملة للأنشطة التي ينفذها العاملون على معدل استهلاك الطاقة ومدى تحقيق الأهداف المرسومة.

3-6: فوائد تطبيق معيار إدارة الطاقة

من أهم فوائد تطبيق نظام إدارة الطاقة في صناعة تكرير النفط أنه يساهم في تعزيز فرص التكامل بين المصافي المتقاربة جغرافياً، علاوة على التكامل بين الوحدات الإنتاجية ضمن المصفاة الواحدة، وذلك من خلال تأمين رؤية شاملة لكافة خطوط الطاقة في المصفاة، بدلاً من الطريقة التقليدية التي تعتمد على التركيز على الخطوط الموجودة في كل وحدة من الوحدات، أو ضمن مجموعة من الخطوط التي ترتبط فيما بينها بخصائص مشتركة، كخطوط بخار الماء والوقود وشبكات الطاقة الكهربائية.

إن حصول المؤسسات الصناعية على شهادة تطبيق معيار إدارة الطاقة يساهم في تحسين أدائها التشغيلي والاقتصادي نتيجة تسهيل إجراءات تخفيض استهلاك الطاقة، كما يساهم في تحسين صورتها لدى الجمهور بأنها تهتم بالمحافظة على الثروات الوطنية من خلال تطبيق إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها، علاوة على حرصها على حماية البيئة (Fuchs, H., et al., 2023)

3-7: دراسة حالة تطبيق برنامج تحسين كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل

تبين هذه الحالة أهم المراحل التي مرت بها عملية تنفيذ برنامج تحسين كفاءة الطاقة الذي طبقتة شركة إكسون موبيل الأمريكية على مصافي النفط والمنشآت البتروكيمياوية التابعة لها، والنتائج التي أمكن الحصول عليها. (ExxonMobil, 2024)

3-7-1: أهداف برنامج تحسين كفاءة الطاقة

يهدف برنامج إدارة الطاقة في شركة إكسون موبيل الأمريكية إلى تحسين كفاءة الطاقة في مصافي النفط والمصانع البتروكيمياوية التابعة للشركة، والموزعة في مناطق مختلفة من العالم.

تبلغ نسبة استهلاك الطاقة في مصافي النفط والمصانع البتروكيمياوية التابعة لشركة إكسون موبيل حوالي 75% من إجمالي الطاقة المستهلكة في منشآت الشركة البترولية، كما تطلق هذه الوحدات ما مقداره 55% من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة التي تطلقها منشآت الشركة.

3-7-2: مراحل تنفيذ برنامج إدارة الطاقة

يتكون برنامج إدارة الطاقة في مصافي النفط والمصانع البتروكيمياوية التابعة لشركة إكسون موبيل من ثلاث مراحل.

- تقييم الوضع الراهن للمصفاة، والبحث عن أسباب ضعف كفاءة تشغيل الوحدات القائمة بأعلى كفاءة ممكنة، مقارنة بأفضل الممارسات المتبعة في هذا المجال.
- تحديد فرص تحسين كفاءة الطاقة الممكن تطبيقها، وتقييم الجدوى الاقتصادية من تنفيذ كل فرصة من الفرص المتاحة.
- تأسيس نظم إدارية تساهم في ضمان استدامة التقدم في إجراءات تحسين كفاءة الطاقة.

• المرحلة الأولى: تقييم الوضع الراهن

بدأت المرحلة الأولى من تطبيق البرنامج بإجراء تقييم شامل لمعدلات استهلاك الطاقة الفعلية في المنشآت القائمة التابعة للشركة، والموزعة في مختلف مناطق العالم، مع تقييم للإجراءات المتخذة في إطار إدارة تحسين كفاءة الطاقة في كل من عمليات التشغيل والصيانة، إضافة إلى مراجعة مستوى كفاءة الطاقة في تصاميم مشاريع إنشاء الوحدات الجديدة. في نهاية هذه المرحلة صدر تقرير مؤلف من 1200 صفحة، يحتوي على وصف شامل للحالة الراهنة للمنشآت، ومقارنة معدلات استهلاك الطاقة في كافة الوحدات مع المعايير الدولية المعتمدة على أفضل الممارسات المتبعة في مجال تحسين كفاءة الطاقة، حيث تم التأكيد على توضيح البنود الأساسية التالية:

- تحديد النقاط التي يتم فيها استهلاك الطاقة.
- تحديد القيمة الفعلية لمعدلات استهلاك الطاقة في كل موقع من مواقع الاستهلاك، ومقارنتها بالقيمة المثالية التي يجب أن تكون عليها في هذه المواقع.
- إعادة قياس معدل استهلاك الطاقة في كافة النقاط للتأكد من صحتها.

لضمان حسن تنفيذ مرحلة تقييم الوضع الراهن تم تحديد القياسات التي يمكن من خلالها تحديد مستوى كفاءة الطاقة في وحدات المصفاة، مع تحديد المستويات الإدارية المسؤولة عن تنفيذ كل نوع من أنواع القياس ومؤشرات القياس المطلوبة.

تشكل متغيرات الطاقة الرئيسية Key Energy Variables قاعدة هرم القياسات، وهي تعبر عن القيم التي يكون التشغيل عندها في وضعه المثالي من حيث كفاءة استهلاك الطاقة والسلامة والاعتمادية. يقوم بتنفيذ هذه القياسات مراقبو التشغيل والمشغلون في موقع الوحدات.

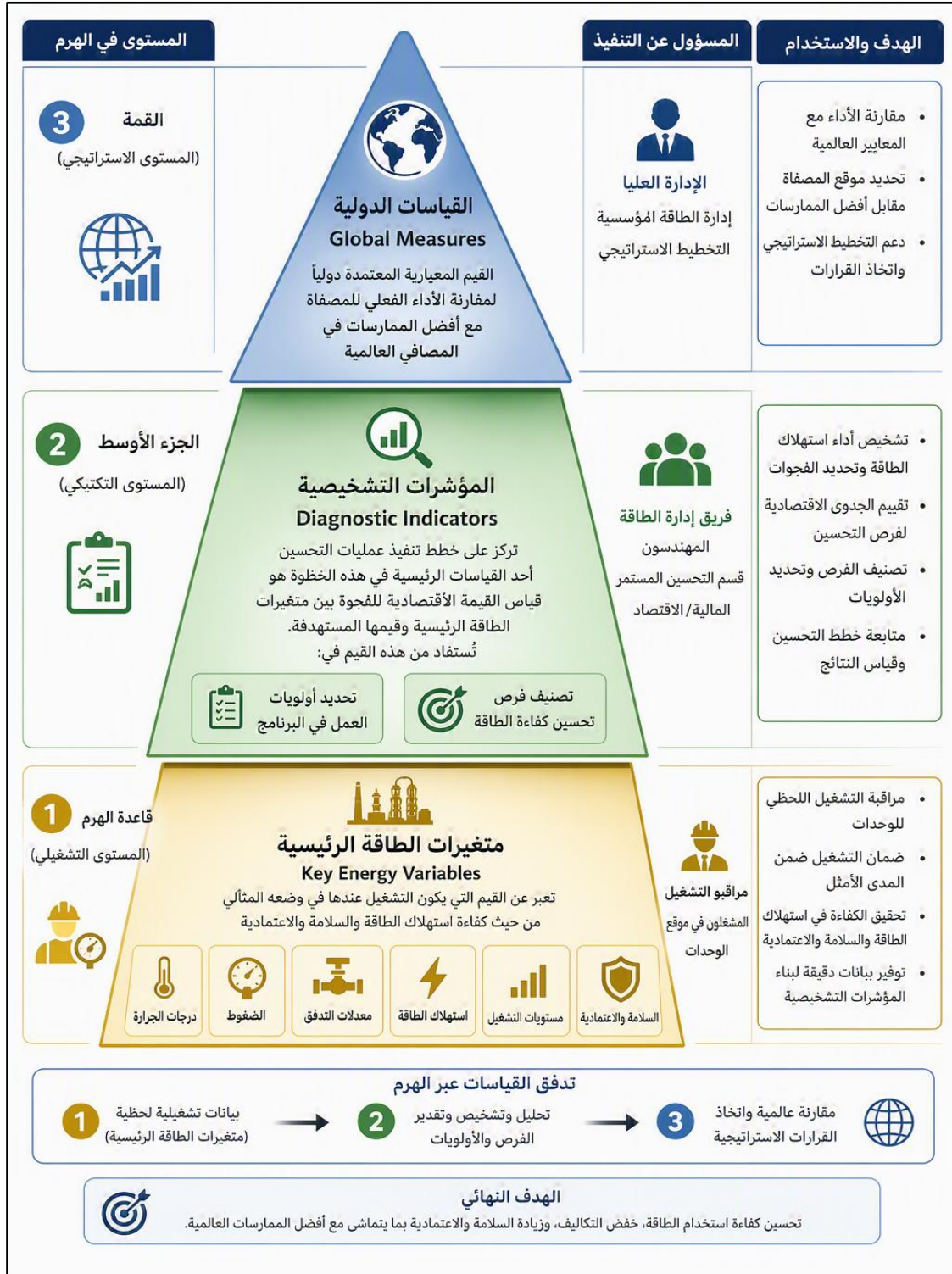
النوع الثاني من القياسات هو المؤشرات التشخيصية Diagnostic Indicators وتمثل الجزء الأوسط من هرم القياسات، والتي تركز على خطط تنفيذ عمليات التحسين. إحدى القياسات الرئيسية في هذه الخطوة هي قياس القيمة الاقتصادية للفجوة بين متغيرات الطاقة الرئيسية وقيمتها المستهدفة. يستفاد من هذه القيم في تصنيف فرص تحسين كفاءة الطاقة، وتحديد أولويات العمل في البرنامج.

أما في قمة الهرم فتأتي القياسات الدولية Global Measures، وتمثل القيم المعيارية المعتمدة دولياً، والتي تستخدم لمقارنة الأداء الفعلي للمصفاة مع أفضل الممارسات المعتمدة في المصافي العالمية.

تهدف إجراءات هذه المرحلة إلى تقييم الوضع الراهن لمستوى كفاءة الطاقة خلال السنوات العشر الماضية في ثلاثين مصفاة نفط، وعشرين مصنع بتروكيماويات تابع لشركة إكسون موبيل.

استغرقت إجراءات التحضير لعملية تقييم برنامج إدارة كفاءة الطاقة شهوراً عديدة، وكانت الخطوة الأولى هي اختيار فريق عمل مكون من مجموعة متخصصين تقنيين من منظمات دولية، ومن أشخاص ذوي خبرة بعمليات التشغيل من موقع الوحدات. تتركز مهمة فريق العمل بإجراء عملية تقييم مستوى كفاءة الطاقة الفعلي وإصدار النتائج والتوصيات. يبين الشكل 3-8 هرم قياسات برنامج إدارة الطاقة في منشآت شركة إكسون موبيل.

الشكل (3-8): هرم قياسات برنامج إدارة الطاقة في منشآت شركة إكسون موبيل



المصدر: ExxonMobil, 2024

• **المرحلة الثانية: تحديد فرص تحسين كفاءة الطاقة**

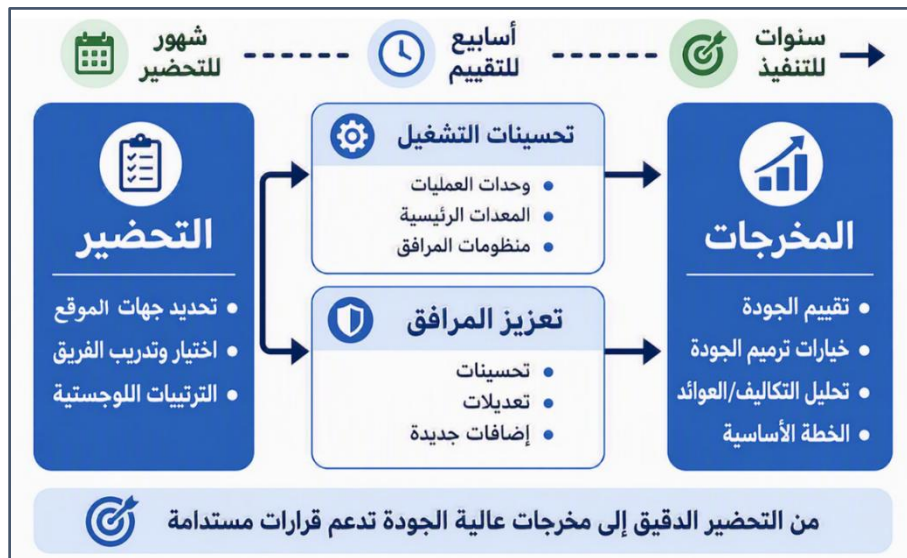
تراوحت المدة اللازمة لهذه العملية من أسبوعين إلى شهرين، وذلك تبعاً لتعقيد وحجم الموقع المراد تقييمه، حيث مرت عملية الإعداد في مسارين متوازيين هما على النحو التالي:

- تحديد إجراءات تحسين العمليات، وذلك اعتماداً على الثغرات التي تم تحديدها بين قيم استهلاك الطاقة الفعلية والقيم المثالية المتبعة في المعايير الدولية المعتمدة.
- تحديد إجراءات تطوير الوحدات، كتحسين نظم التشغيل، أو إدخال التعديلات، أو إضافة معدات، أو أجهزة جديدة.

تم بعد ذلك تحديد المخرجات الرئيسية التي تتضمن الإجراءات اللازمة لترميم الثغرات، وتحليل التكاليف الاقتصادية لكل خيار من الخيارات المقترحة، ثم تصنيف هذه الخيارات إلى إجراءات يمكن تنفيذها بدون تكاليف استثمارية، وأخرى متوسطة التكاليف، وأخرى عالية التكاليف قد يحتاج تنفيذها عدة سنوات.

يبين الشكل 3-9 مكونات وأهداف ومخرجات مرحلة تحضير برنامج تحسين كفاءة الطاقة في منشآت تكرير البتروكيماويات في شركة إكسون موبيل، والمدة الزمنية التي مرت بها عملية التنفيذ لكل مرحلة من المراحل.

الشكل (3-9): مكونات مرحلة تحضير برنامج كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل



المصدر: ExxonMobil, 2024

• المرحلة الثالثة: تأسيس نظم إدارية لتقييم نتائج البرنامج

تم في هذه المرحلة تقييم النتائج التي أمكن الحصول عليها نتيجة تنفيذ برنامج تحسين كفاءة الطاقة مع تحديد الصعوبات التي واجهت عملية التنفيذ وسبل معالجتها.

أظهرت نتائج التقييم أن الخيارات المجدية اقتصادياً يمكن أن تساهم في ردم حوالي 80% من الفجوة القائمة بين كفاءة الطاقة الفعلية والكفاءة المعيارية المعتمدة دولياً وفق أفضل الممارسات المتبعة، أو ما يطلق عليه باصطلاح (مؤشر كفاءة الطاقة). أما النسبة الباقية 20% فقد تبين أن تنفيذها بالوسائل التقنية المتاحة حالياً وبالأسعار الحالية للطاقة غير مجد اقتصادياً.

تم تصنيف فوائد تطبيق البرنامج إلى ثلاثة أقسام تتوزع بين العمليات والمعدات والوحدات المساندة. كما أظهرت دراسة تقييم نتائج المشروع أن نصف الفرص يحتاج إلى استثمارات مرتفعة، بينما أمكن تنفيذ النصف الآخر بدون استثمارات أو باستثمارات منخفضة. يبين الشكل 3-10 تصنيف فوائد برنامج تحسين كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل.

الشكل (3-10): تصنيف فوائد برنامج تحسين كفاءة الطاقة في شركة إكسون موبيل



المصدر: ExxonMobil, 2024

3-8: دراسة حالة: تطبيق نظام إدارة البيئة ISO:50001:2018 في مصفاة سيلاكاب

حصلت مصفاة سيلاكاب على إجازة نظام إدارة الطاقة ISO: 50001:2018، في عام 2021، وهي أكبر مصفاة في إندونيسيا، تبلغ طاقتها التكريرية 348 ألف برميل/اليوم، وتملكها شركة Pertamina المملوكة للحكومة الإندونيسية. (Bahagia, D., 2022)

يمثل استهلاك الطاقة في المصفاة نسبة 62% من تكاليف التشغيل، باستثناء المواد الخام، حيث بلغ استهلاكها في عام 2020 ما مقداره 39,920,009 مليون وحدة حرارية بريطانية (MMBTU) من الطاقة كوقود. كما تستهلك 17 ميغاواط من الكهرباء من شركة الكهرباء الحكومية.

يتمثل التحدي الأكبر الذي يواجه مصفاة سيلاكاب في تقلب أسعار الوقود، والتي تميل إلى الارتفاع، علاوة على ارتفاع تكلفة البضائع المباعة مع ارتفاع أسعار النفط الخام، بينما تخضع أسعار المنتجات الرئيسية للشركة، مثل البنزين ووقود الطائرات، لمتطلبات الدعم الحكومي، مما جعل خفض تكاليف الإنتاج أمراً ضرورياً، مع التركيز بشكل خاص على كفاءة استهلاك الطاقة باعتبارها الموضوع الأهم.

من جهة أخرى تواجه المصفاة تحديات أخرى تتركز في التزام إندونيسيا بخفض انبعاثات الاحتباس الحراري بنسبة 29% بحلول عام 2030، والالتزام المصفاة بخفض مؤشر أداء كثافة الطاقة EII إلى أدنى من 88.61 بحلول عام 2026.

ولمواجهة هذه التحديات أولت مصفاة سيلاكاب اهتماماً بالغاً بتحسين كفاءة الطاقة، وتعزيز الإنتاجية والقدرة التنافسية، وزيادة أمن إمدادات الطاقة، فضلاً عن المساهمة في خفض الانبعاثات بما يتوافق مع الاستراتيجية المبنية في الشكل 3-11. كما قامت بالعديد من الإجراءات، من أهمها:

- الحصول على شهادات ISO 14001 و ISO 9001 و ISO 50001.
- إنشاء وحدة استخلاص الكبريت لتحسين جودة الغاز المستخدم كوقود في الأفران عن طريق تحويل غاز كبريتيد الهيدروجين (H₂S) إلى منتج كبريت سائل.
- تركيب خلايا شمسية بقدرة 2.6 ميغاواط مع نظام متصل بالشبكة بدون بطاريات، كجزء من برنامج الطاقة المتجددة لتقليل النفايات.
- تطبيق مفهوم المباني الخضراء في مباني المكاتب.

انطلقت عملية تنفيذ نظام إدارة الطاقة ISO 50001:2018 كمرحلة أولى في وحدة التكسير الحفزي المائع للبواقي الثقيلة RFCC بتكلفة إجمالية قدرها 18896 دولار أمريكي.

3-8-1: نتائج تطبيق نظام إدارة الطاقة

حقق مشروع تطبيق نظام إدارة الطاقة ISO:50001:2018 خلال السنة الأولى من إنجاز المشروع النتائج التالية:

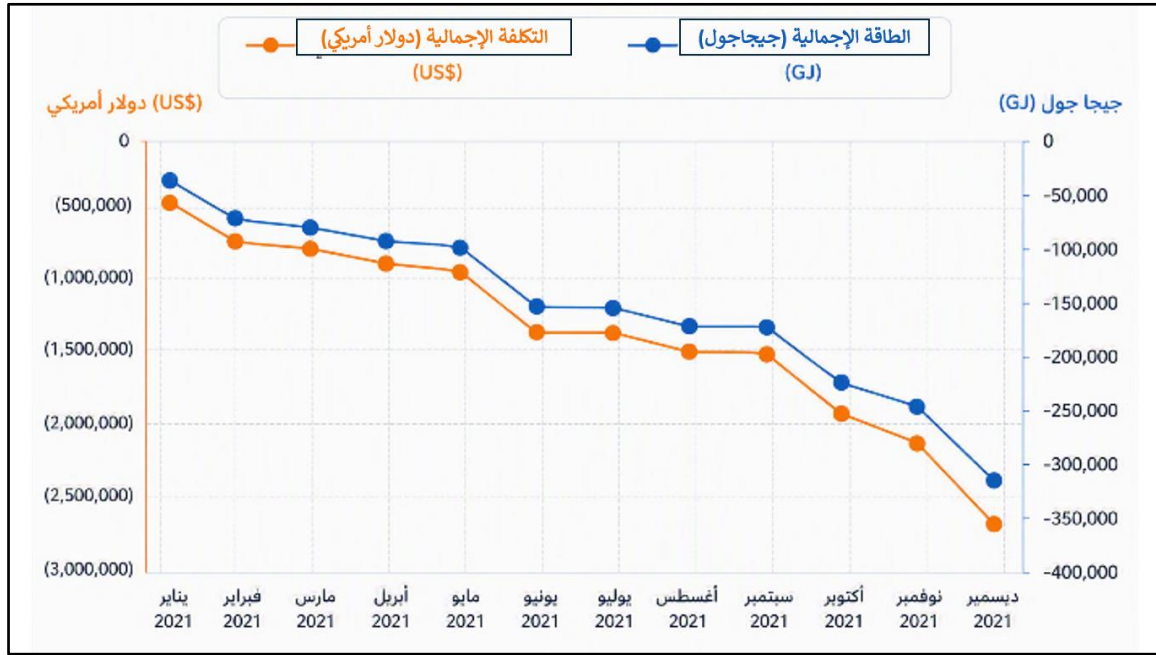
- بلغ إجمالي تخفيض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون مبلغ 26,934 طن متري.
- بلغ إجمالي تكلفة توفير استهلاك الوقود مبلغ 2,797,027 دولار أمريكي. الشكل 3-12.

الشكل (3-11): استراتيجية مصفاة سيلاكاب لتحسين كفاءة الطاقة



المصدر: Bahagia, D., 2022

الشكل (3-12): إجمالي توفير الطاقة في وحدة التكسير الحفزي للبواقي الثقيلة



المصدر: Bahagia, D., 2022

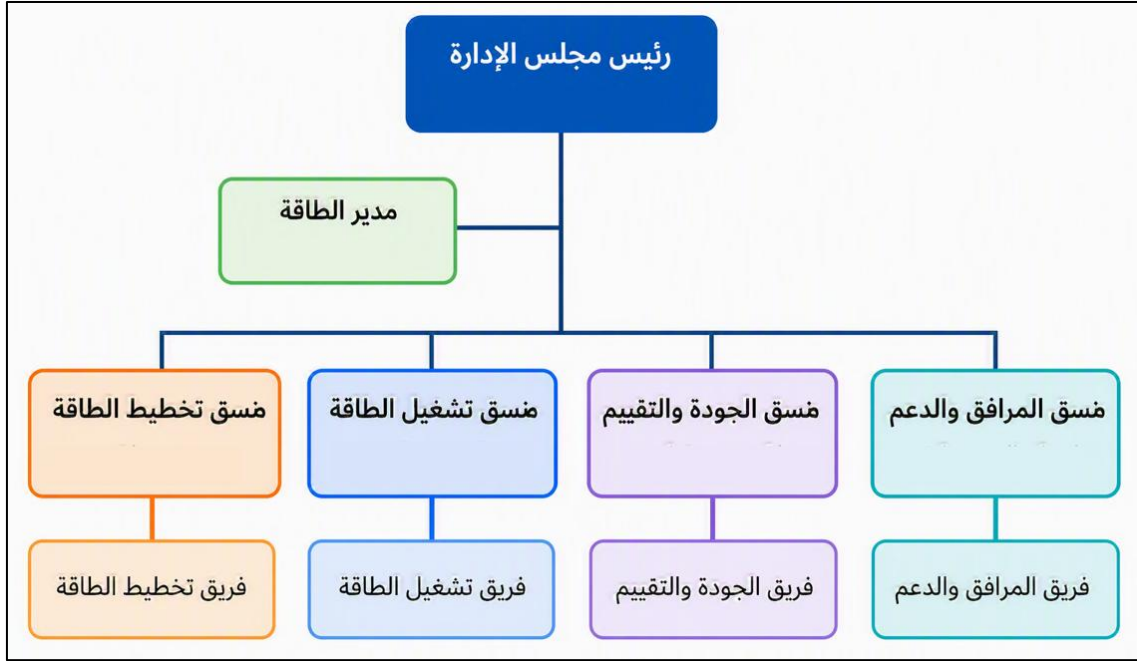
إضافةً إلى الفوائد المالية حقق المشروع فوائد أخرى غير مباشرة، منها:

- تحسّن مؤشر كثافة الطاقة في المصفاة بشكل ملحوظ نتيجةً لبرنامج الطاقة المُطبّق بشكل مستدام والمتوافق مع معيار ISO 50001. وهذا مكن المصفاة من أن تصبح أفضل مصفاة في إندونيسيا في خفض مؤشر كثافة الطاقة (EI). كما احتلت المرتبة الثانية كأفضل مصفاة في إندونيسيا في تطبيق تحسين أداء الغلايات والأفران.
- التزام مصفاة سيلاكاب بالمراقبة الدورية وتقليل تسربات البخار في المصفاة، مكن المصفاة من الحصول على المرتبة الثانية كأفضل مصفاة في إندونيسيا في تحقيق برنامج انعدام تسرب البخار.
- تعزيز الكفاءات الشخصية من خلال التعلم الإلكتروني وتحسين برنامج الشهادات ليشمل شهادات مدقق الطاقة، ومدير الطاقة، والتدقيق الداخلي لنظام إدارة الطاقة.
- تعزيز الوعي وتحسين القدرات في مجال إدارة الطاقة وترشيد استهلاكها.
- زيادة موثوقية وحدة التكسير الحفزي المائع، وتعزيز جاهزية المعدات للحفاظ على أقصى طاقة إنتاجية، وذلك المنتجات عالية القيمة بنسبة تبلغ 72.07% مقابل الهدف المحدد وهو 67.88%، بإجمالي إنتاج يبلغ 84,176 مليون لتر. وبذلك، سيتم ضمان إمدادات البنزين وتوزيعه على المستهلكين إلى المستوى الوطني (35% من إجمالي الطلب الوطني/الاحتياجات المحلية).

3-8-2: خطة تنفيذ البرنامج

التزمت الإدارة العليا للمصفاة بتطبيق نظام إدارة الطاقة ISO 50001 ومواصلة الحصول على شهادة نظام إدارة الطاقة، وقامت بتشكيل فريق عمل متخصص في مجال الطاقة، كما هو مبين في الشكل 3-13، بالإضافة إلى توفير فرص التطوير المهني للموظفين من خلال التدريب المستمر.

الشكل (3-13): فريق العمل المتخصص بتنفيذ المشروع



المصدر: Bahagia, D., 2022

خلال الفترة من 2017 إلى 2021، التزمت الإدارة العليا بتوفير الموارد اللازمة لتنفيذ المشروع من حيث الميزانية الإجمالية البالغة 1.96 مليون دولار أمريكي. وقد بلغت الميزانية 2.1 مليون دولار أمريكي في عام 2019 نتيجة استبدال حراقات الفرن Burners، والذي كان أحد برامج ترشيد استهلاك الطاقة. وبعد تطبيق معيار ISO 50001، ارتفعت ميزانية البرنامج إلى 2.7 مليون دولار أمريكي، كما هو مبين في الشكل 3-14.

الشكل (3-14): الميزانية الإجمالية لمشروع تطبيق برنامج كفاءة الطاقة ISO 50001

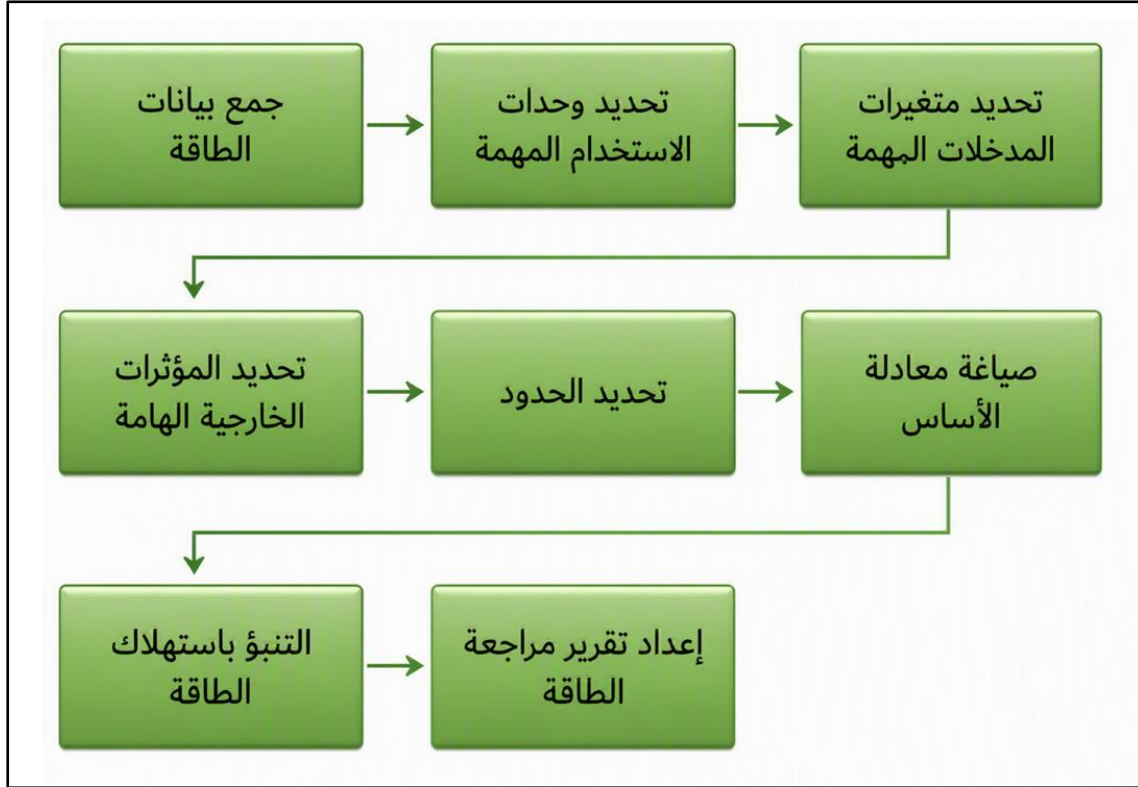


المصدر: Bahagia, D., 2022

• مراجعة بيانات الطاقة

قام فريق البرنامج بإجراء مراجعة لبيانات الطاقة، بهدف تحديد مواقع ومعدلات استهلاك الطاقة، وفرض تحسين الكفاءة، حسب ما هو مبين في الشكل 3-15.

الشكل (3-15): عملية مراجعة بيانات الطاقة



المصدر: Bahagia, D., 2022

• تحديد أهداف المشروع

قبل الشروع في تنفيذ البرنامج حددت الشركة الأهداف المتوقعة تحقيقها في تخفيض استهلاك الطاقة، وقائمة فرص ترشيد الطاقة، وخطة العمل، كما أجرت دراسة جدوى تتضمن تحليل التكاليف.

تستهدف الشركة تحقيق خفض في مؤشر كفاءة الطاقة بنسبة 0.16%، أي ما يعادل 2,797,027 دولاراً أمريكياً. وبناءً على تقييم سجل المخاطر تم إعطاء الأولوية لفرص ترشيد الطاقة خلال السنة الأولى بعد تطبيق معيار ISO 50001، وذلك لتعزيز الجهود المبذولة لتحسين استهلاك الطاقة وإدارة فقد البخار. وتتمثل الأولوية التالية للشركة في تحسين المعدات التي تعمل بالبخار (مثل خزانات الغاز، ومضخات مياه التبريد، ووحدات توليد الطاقة).

• التنفيذ والتشغيل

تم تنسيق جميع خطط العمل مع الإدارة العليا، ويوضح الشكل 9 أهم البرامج التي تم تنفيذها. بناءً على التقرير الأول لأداء الطاقة، نجحت مصفاة سيلاكاب في تحقيق وفورات في الطاقة بقيمة إجمالية قدرها 2,797,027 دولاراً أمريكياً، مقارنة بالهدف المحدد البالغ 2,487,386 دولاراً أمريكياً، أي بزيادة تعادل 12% عن الهدف الأولي.

• مراجعة قوائم المشتريات

أجرت مصفاة سيلاكاب مراجعة شاملة لمواصفات وميزانية مشتريات السلع والخدمات كخطوة ضمن خطة العمل لخفض تكاليف استهلاك الطاقة. وقد كان لهذه الخطوة أثر كبير على تحديد فرص تخفيض استهلاك الطاقة. فعلى سبيل المثال، في حالة مشتريات خدمات المياه المعالجة المتنقلة، وبعد تطبيق هذا الإجراء الجديد، حققت المصفاة أرباحاً تصل إلى 2.4 مليون دولار أمريكي، بينما بلغت استثماراتها حوالي 0.8 مليون دولار أمريكي فقط. كما هو مبين في الشكل 3-16.

الشكل (3-16): تحليل نتائج إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة سيلاكاب

البرنامج / الإجراء	التكلفة (دولار)	الوفر (دولار)	مؤشر كثافة الطاقة (EII)	
• استبدال غلاية الزيت المساعدة Tip Oil Aux Boiler 151B-501 A/B/C	18,197	684,573	-0.0125	1 تحسين معدات الغلايات والأفران
1. تحسين تشغيل الغلايات والأفران لتقليل استهلاك الوقود.	20,490	78,291	-0.0075	2 تحسين ظروف تشغيل الغلايات والأفران
2. تنفيذ برامج رفع كفاءة العاملين (Upskilling) في تحسين تشغيل الغلايات والأفران	—	—	—	3 إدارة البخار
1. تقييم وإصلاح تسربات البخار والعزل الحراري	—	—	—	4 تركيب وحدة معالجة مياه متنقلة
2. عزل الأنابيب والصيانة الدورية لمصائد البخار مع تركيب أجهزة مراقبة وتشغيل أساسية (BOC و BCC)	13,851	55,111	-0.02	
1. استئجار وحدة معالجة مياه متنقلة	—	—	—	
2. تطوير وإعادة تحجيم الخط من PVC (6 بوصة) إلى HDPE (8 بوصة)	—	—	—	
3. تعديل خطوط التغذية والمنتج والمركز والمنتج خارج المواصفات لربطها بالوحدة المتنقلة	831,959	1,588,332	-0.12	
إجمالي التكلفة 883,959 دولار	إجمالي الوفر 2,406,307 دولار	إجمالي المشروعات 9 مشروعات	متوسط تحسين مؤشر كثافة الطاقة (EII) -0.0381	

المصدر: Bahagia, D., 2022

• بناء القدرات

لتعزيز كفاءة الفريق، تم تدريب 53% من إجمالي المشغلين على تحسين أداء الغلايات والأفران، وكافة إجراءات تحسين كفاءة الطاقة

• خطة المراقبة والقياس

شكلت مصفاة سيلاكاب فريقاً متخصصاً في أنظمة إدارة الطاقة، يركز على إنجاح تطبيق هذه الأنظمة، وتقديم الدعم الكامل في تنفيذ البرامج المتعلقة بإدارة الطاقة وترشيدها. وذلك من خلال تنفيذ المسؤوليات التالية:

- وضع خطط لبرامج ترشيد الطاقة، بما في ذلك تحديد الأهداف وبرامج ترشيد الطاقة.
- إعداد إجراءات تشغيلية لترشيد الطاقة.
- إجراء عمليات تدقيق الطاقة، ودعم تنفيذ توصياتها، وبرامج ترشيد الطاقة.
- توعية الموظفين بأهمية ترشيد الطاقة.

يستخدم فريق أنظمة إدارة الطاقة في شركة PT KPI Unit Cilacap أدوات قياس رقمية متطورة لمراقبة أداء الطاقة والتحكم فيه (استهلاك الغاز والوقود، واستخدام البخار). تتم مراقبة قيم التشغيل الحرجة (تدفق غاز الوقود والزيت، وتدفق البخار، وضغط غاز الوقود والزيت، وضغط البخار) من خلال نظام التحكم (DCS) والذي يمكن عرضه ومراقبته في الوقت الفعلي.

إلى جانب المراقبة عبر الإنترنت، يتولى فريق تشغيل الطاقة مسؤولية تنسيق تحليل استهلاك الطاقة وتقديم اقتراحات التحسين والإبلاغ عن النتائج، ومراقبة جاهزية معدات الطاقة ووضع خطة إصلاح بالإضافة إلى الإبلاغ عن أداء المعدات التي تم إصلاحها.

• التدقيق الداخلي ومراجعة الإدارة:

يُراجع أداء الطاقة في المصفاة من خلال عدة برامج دورية. تُجري الإدارة جولات تفقدية أسبوعية لمتابعة الأنشطة التشغيلية، ويُقدم فريق الطاقة تقارير أداء الطاقة إلى مجلس الإدارة من خلال اجتماع تنسيق الطاقة الشهري، ويُجرى تدقيق مراقبة سنوياً، بالإضافة إلى تدقيق الطاقة ودراسة معيارية وفقاً لمعايير سولومون تُجرى كل ثلاث سنوات.

• تعميم اعتماد معيار ISO 50001 على كافة وحدات المصفاة

نظراً لنجاح مشروع تطبيق نظام إدارة الطاقة في وحدة التكسير الحفزي المائع قررت إدارة مصفاة سيلاكاب خطة لاعتماد معيار ISO 50001 في جميع مصانعها، وذلك التزاماً منها بتنفيذ برامج مستدامة لترشيد استهلاك الطاقة. ولتحقيق هذه الغاية قام فريق إدارة الطاقة بإعداد خارطة طريق لتحسين كفاءة الطاقة EII خلال الفترة 2022 - 2026 مبيئة في الشكل 3-17.

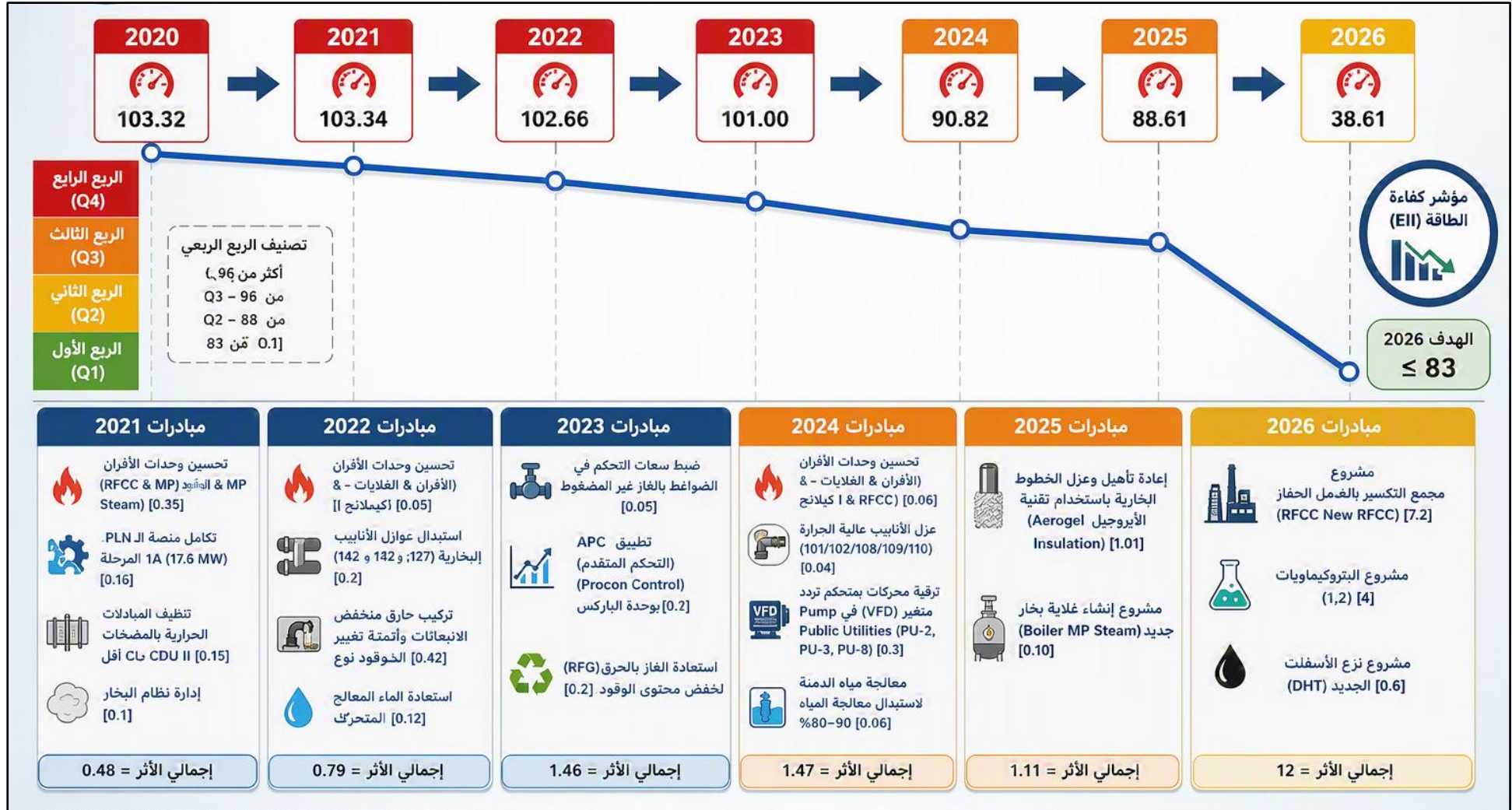
3-9: دراسة حالة تطبيق برنامج إدارة كفاءة الطاقة في المصافي الأوروبية

أطلق على برنامج إدارة الطاقة في المصافي الأوروبية اسم AMPERE¹، ويتكون من الإجراءات التالية:

- تحديد أفضل المعايير المتبعة في تقييم مستوى كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط، وتطبيق أفضل الممارسات وتدريب العاملين في مجال تعزيز إدارة العمليات التشغيلية، وعمليات صيانة المعدات.
- تحديد الاختناقات والثغرات التي تؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة، والبحث عن الحلول المناسبة لكل موقع من المواقع المحددة.
- تطبيق خطة تنفيذية ومراقبة لمستوى تطور الأداء في مجال تحسين كفاءة الطاقة.

¹ Act and Manage our Performance in Energy for Refining Europe

الشكل (3-17): خارطة طريق تحسين كفاءة الطاقة في مصفاة سبلاكاب



المصدر: Bahagia, D., 2022

شاركت في تنفيذ برنامج إدارة الطاقة شركات استشارية خارجية متخصصة في مجال تحسين كفاءة الطاقة. كما تم تصنيف الإجراءات التي تضمنتها خطة العمل إلى مجموعتين، تضمنت المجموعة الأولى الإجراءات التي تتعلق بتحسين الأداء التشغيلي للوحدات والمعدات القائمة، بينما تناولت المجموعة الثانية الإجراءات التي تحتاج إلى استثمارات كبيرة وخطة تنفيذية تحتاج إلى مدة زمنية طويلة لإنجازها:

مجموعة الحلول القريبة الأجل، وتمثل مجموعة الإجراءات المتعلقة بتحسين أداء الوحدات القائمة، من خلال رفع الوعي بمبادئ وأهمية تحسين كفاءة الطاقة، وتدريب العاملين، والعناية بترتيب ونظافة مواقع العمل، والمراقبة المستمرة لمعدلات استهلاك الطاقة، وهي إجراءات يمكن تنفيذها على المدى القريب بدون تكاليف مالية باهظة، وفيما يلي بعض الأمثلة على هذه الإجراءات:

- تحسين ظروف تشغيل الأفران في عمليات التكرير.
- إدارة شبكات الطاقة (البخار والوقود والكهرباء) بشكل أكثر فعالية.
- تبادل الخبرات في مجال تطبيق إجراءات تحسين كفاءة الطاقة بين مصافي النفط الأوروبية.
- الاهتمام بالفقرات الخاصة بإجراءات تحسين كفاءة الطاقة في برامج تدريب العاملين.
- بناء الوعي لدى العاملين في المصفاة بمبدأ الكفاءة الاقتصادية لعمليات التشغيل، من خلال نشر الأهداف المطلوب تحقيقها، والتركيز على مفهوم مؤشرات الأداء الرئيسية التي يتم إعدادها لمراقبة تطور الأداء في المصفاة.
- تطوير عمليات النمذجة Modelling ووسائل تعظيم الإنتاج.
- الاهتمام بعمليات الفحص الفني الدوري للمعدات الرئيسية، كالأفران ومصائد البخار والعنفات، وذلك بهدف الكشف عن الأعطال قبل تفاقمها.
- إعداد خطط لإجراء عمليات غسيل المعدات أثناء وجودها في دارة العمل، والتي تتعرض لتوضع الرواسب على سطوح انتقال الحرارة، كالأفران والمبادلات الحرارية.

ارتفع تصنيف مؤشر كفاءة الطاقة نتيجة تطبيق برنامج إدارة كفاءة الطاقة بحوالي 2% في مصافي نفط شركة توتال، وهذا يمثل بالنسبة للشركة توفير ما يعادل 50 مليون يورو سنوياً من تكاليف التشغيل.

- **مجموعة الحلول البعيدة الأجل،** وهي الحلول التي تتضمن تطوير الوحدات الإنتاجية وإدخال تغييرات هيكلية عليها من خلال إعداد خطط إستراتيجية تناسب كل موقع من مواقع مصافي النفط التابعة للشركة، وذلك لتحقيق الأهداف التالية:
 - تخفيض استهلاك الطاقة وما يرافقه من انبعاث لغاز ثاني أكسيد الكربون.
 - رفع نسبة استرجاع الطاقة العادمة وتخفيض ما أمكن من الحرارة الضائعة إلى الجو.
 - تحسين كفاءة استخدام البخار في مواقع المصفاة.
 - تطبيق تقنيات التوليد المشترك لتوليد الطاقة الكهربائية والبخار.
 - تحسين التكامل الحراري فيما بين الوحدات والمعدات القائمة في هذه الوحدات.

قدرت التكاليف الاستثمارية لإجراءات المجموعة الثانية بحوالي 300 مليون يورو للمصفاة، حيث ساهمت في رفع تصنيف مؤشر كفاءة الطاقة بحوالي 3% بعد خمس سنوات من إعداد الخطة الإستراتيجية للتطوير.

الاستنتاجات والتوصيات

تأتي أهمية تطبيق برامج تحسين كفاءة الطاقة في صناعة تكرير النفط من كونها إحدى الصناعات الشديدة الاستهلاك للطاقة، حيث تأتي في المرتبة الثالثة بعد صناعة الحديد والصلب وصناعة البتروكيماويات، وقد بينت الدراسة أهم الإجراءات التي يمكن تطبيقها على عمليات تكرير النفط بغية تحسين كفاءة استخدامها للطاقة، ويمكن تلخيص ما توصلت إليه الدراسة من استنتاجات وتوصيات على النحو التالي:

- التأكيد على ضرورة إنشاء قاعدة بيانات مشتركة بين مصافي النفط في الدول الأعضاء في أوابك، والدول العربية الأخرى وذلك بهدف رصد التغيرات التي تطرأ على معدلات استهلاك الطاقة وإدخال التعديلات المناسبة في الوقت المناسب، علاوة على تعزيز فرص التكامل والتعاون بين مصافي النفط وتبادل الخبرات في مجال ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها.
- إن تطبيق برامج ترشيد استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط يساهم في الحفاظ على الموارد الطبيعية لأطول فترة ممكنة، وإلى الحد من انبعاث الملوثات إلى البيئة المحيطة.
- أثبتت التجربة العملية أن تطبيق إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة يساهم في تحسين ربحية المصفاة، إضافة إلى تحسين قدرتها على الالتزام بالمتطلبات الخاصة بحماية البيئة من التلوث.
- يمكن ترشيد استهلاك الطاقة في صناعة تكرير النفط في عدة مجالات، كتحسين عمليات التكامل الحراري بين الوحدات، وتحسين العزل الحراري، وضبط حرق الوقود في الأفران والغلايات، وتحسين استرجاع الحرارة الفائضة في غازات المدخنة للاستفادة منها في تسخين هواء الاحتراق .. وغيرها.
- يؤدي استخدام التقنيات الحديثة لأجهزة التحكم والمراقبة المستمرة لكافة مواقع مصفاة النفط إلى خفض حجم استهلاكها من الطاقة، وبالتالي خفض حجم الملوثات الناتجة عنها كما يؤدي إلى تحسين ربحيتها وخفض كلفة التشغيل.
- يمكن عن طريق إضافة بعض المبادلات الحرارية، وإعادة توزيع مسارها في بعض وحدات مصافي النفط، خفض حجم الوقود المستهلك، وبكلفة استثمارية مقبولة، مع استرجاع رأس المال في فترة قصيرة تتراوح بين العام والعامين.
- يجب أن تكون إجراءات تحسين كفاءة الطاقة في صناعة التكرير مستمرة، وعلى المدى البعيد، وذلك بهدف رصد التغيرات التي تطرأ على معدلات الاستهلاك مع الزمن وإدخال التعديلات المناسبة في الوقت المناسب.
- تظهر التجارب العملية أن الرقمنة أصبحت مساراً عملياً وضرورياً لخفض استهلاك الطاقة في مصافي تكرير النفط، وأن فوائدها لا تقتصر على التحسين الرقمي للوحدات الفردية فحسب، بل تشمل التكامل الأوسع نطاقاً بين المرافق والصيانة والتخطيط وإدارة القرارات.
- تشجيع البحث العلمي بهدف تطوير التقنيات التي تساهم في مجال تحسين كفاءة الطاقة..

ABSTRACT

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN THE PETROLEUM REFINERIES

Petroleum refineries are among the most energy-intensive industrial sectors, consuming vast amounts of fuel and electricity for processes such as distillation, cracking, and polymerization. Energy costs can account for 30–50% of operating expenses, making energy efficiency a critical driver of profitability and environmental compliance.

Interest in improving energy efficiency in the industrial sector is increasing around the world, especially in petroleum refining, which is known as one of the most energy intensive industries, because large quantities of petroleum refined products, natural gas, refinery gases and electric power are used as energy input in various equipment and processes.

Energy management in refineries is a strategic imperative for reducing operational costs, enhancing sustainability, and meeting regulatory requirements. This study explores the stages of an energy management plan, benefits, challenges, and cost considerations. It provides actionable insights for industry stakeholders aiming to optimize energy use and improve competitiveness. The study answers the following questions:

- Where is energy used in the petroleum refinery?
- What are the main opportunities for improving energy efficiency in the petroleum refineries?
- What are the barriers and drivers to energy efficiency improvement?

The study highlights the importance and the opportunities of energy conservation in the refining industry which include heat integrations, process optimizations, furnace upgrading and maximization of the efficiency of power generation and cogeneration, optimization of fuel systems, reduction of flaring, minimizing steam and fuel leaks, improvement in insulation material and thickness. Energy efficiency can also be improved through the application of new technology that yields a lower input/output ratio, using the same fuel, improving maintenance programs, and using advanced process control.

An energy management standard creates a foundation for improvement and provides guidance for managing energy throughout an organization. A successful program in energy management begins with a strong organizational commitment to continuous improvement of energy efficiency. This typically involves establishing an energy policy and creating a cross-functional energy team. Steps and procedures are then put in place to assess performance through regular reviews of energy data, technical assessments, and benchmarking.

This study includes case studies from around the world with specific energy and cost savings data. The actual payback period and energy savings for individual refineries will vary, depending on plant configuration, size, location, and operating characteristics. Hence, the values presented in this study are offered as guidelines.

The study recommends that for optimizing energy efficiency, companies need to set out clear goals and priorities for their paths forward, start with measures that close energy gaps and improve energy use, and build internal management systems and capabilities that enable sustainable energy improvements.

The study concludes that the introduction of modern technologies to improve energy efficiency in the petroleum refineries could contribute to reducing energy consumption. Furthermore, a structured energy management plan is a cornerstone for operational excellence in oil refineries. Combining technical upgrades, integration strategies, and digital monitoring ensures long-term competitiveness and sustainability. In short, the refineries that invest in energy management today will lead the industry tomorrow.

المراجع

المراجع باللغة العربية

- أوابك 2025 " صناعة تكرير النفط " ملتقى أساسيات صناعة النفط والغاز-دولة الكويت- منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول، أوابك. www.oapecorg.org
- أوابك، 2021، دور التحول الرقمي في تحسين أداء صناعة التكرير والبتروكيماويات منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول، أوابك. www.oapecorg.org
- أوابك 2011 "دور إدارة الهيدروجين في تحسين القيمة المضافة في صناعة التكرير" منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوابك" مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد السابع والثلاثون، العدد 139، خريف 2011. www.oapecorg.org

المراجع باللغة الإنجليزية

- Ahmednooh, M., et al., 2025 "Blend Scheduling Solutions in Petroleum Refineries towards Automated Decision-Making in Industrial-like Blend-Shops" MDPI.
- Akhtar, M., et al., 2024 "Recent Advancements in Catalysts for Petroleum Refining" MTDP
- Almanza, F., & Santos, G., 2025 "Toward sustainable cogeneration in an oil refinery: A synergy Between ISO 50001 and 14001 Management Systems" International Journal of Renewable Energy Development.
- Atukpa, T., et al., 2026 "Simulation of Waste to Energy Plant Using Flue Gas from Fluid Catalytic Cracking Regenerator" International Journal of Engineering Research and Development. Volume 22, Issue 5 (May 2026), PP 483-498
- Azmi, P., et al., 2024 "A Review of Predictive Analytics Models in the Oil and Gas Industries" MDPI <https://doi.org/10.3390/s24124013>
- Bahagia, D., 2022 "PT Kilang Pertamina Internasional (PT KPI) Unit Cilacap" Available at: www.cleanenergyministerial.org/EMAwardsEMAwards
- Blauth, S., et al., 2024 "CFD-based Shape Optimization of Structured Packings for Enhancing Separation Efficiency in Distillation" Chemical Engineering science. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120803>
- Cagno, E., 2012 "Drivers for Industrial Energy Efficiency: An Innovative Framework" Milano.
- Carrera, I., et al. 2026 "Intelligent Computational Modeling of ISO-50001, Energy Performance Indicators for Sustainable Energy Management Systems: A Systematic Review" <https://doi.org/10.3390/a19070533>
- Clements, P., 2024 "Refinery greenhouse gas reduction pathways" Hydrocarbon Engineering Magazine, February 2024.
- CONCAWE, 2022 "Refinery Energy Systems and Efficiency" CONCAWE Review, Volume 21 • Number 1 • Summer 2012.
- Coppin, D., et al., 2011 "Industry Responses to Climate Change: The Point of View of an Oil and Gas Company" Paper presented to 20th World Petroleum Congress, Qatar, Doha, 2011.

- Damasceno, A., et al., 2024 **"The Evolution Of Organizational Energy Management: Developed Methodologies And The ISO 50001 Standard"** IOSR Journal of Business and Management Volume 26, Issue 11. Ser. 2 (November. 2024), PP 10-18. www.iosrjournals.org
- DLSS, 2025 **"7 Effective Ways to Prevent Fouling in Heat Exchangers for Long-Term Performance"** Available at: www.dlsspipeline.com
- DSS, 2023 **"Effective energy management in the oil and gas sector"** Available at: www.consultdss.com
- Ebinger, M., Scheyhing, J. (2024). **"Energy Performance Indicators According to ISO 50001:2018 Requirement: Formation: Suitability: Normalization"** Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65479-4_30
- EIA, 2024, **"Refining Crude Oil: Inputs and Outputs"** U.S. Energy Information Administration.
- Emch, L., 2025 **"Enhancing fired heater efficiency, reliability, and longevity"** Digital Refining Magazine.
- Emerson, 2022 **"Maintenance Cycles on Critical Instruments Extended Through Wireless Monitoring at Top U.S. Petrochemical Plant"** www.emerson.com
- Emam, A., 2015 **"Gas Flaring in Industry: An Overview"** Department of Chemical Eng. And Pet. Refinery, Suez University, Egypt. Available at: www.vurup.sk/petroleum-coal
- EMAS, 2012 **"Energy Management Systems in Practices ISO 50001: A Guide for Companies and Organizations"** Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) Berlin, Germany. www.bmu.de
- Evbuomwan, B., et al., 2018 **"Simulation and Evaluation of A Flare Gas Recovery Unit For Refineries"** European Journal of Advances in Engineering and Technology, Available online www.ejaet.com
- ExxonMobil, 2024 **"Producing power efficiently for our own operations"** Available at: <https://corporate.exxonmobil.com/>
- Evbuomwan, B., et al., 2018 **"SIMULATION AND EVALUATION OF A FLARE GAS RECOVERY UNIT FOR REFINERIES"** European Journal of Advances in Engineering and Technology. Available online at: www.ejaet.com
- Fuchs, H., et al., 2023. **"ISO 50001-Based Energy Management Systems as a Practical Path for Decarbonization"**. Energies, <https://escholarship.org/uc/item/16w120sc>
- Gardner, J. 2024 **"Digitalization in refineries: A strategic roadmap for operational excellence"** KBC, a Yokogawa Company, Texas. Hydrocarbon Magazine, February 2024.
- Garieva F.R., Khasanov K.F., Akhmerov D.R. 2025 **"Modernization of the catalytic reforming unit"** Oil Refining and Petrochemistry Magazine. Issue 12, 2025
- Hightech Energy, 2026 **"Hydrogen Plants in Refinery Projects: Integration Challenges and Complexities"** Houston, United States. Available at: <https://hightechenergy.com/2026/02/02/hydrogen-plants-in-refinery-projects-integration-challenges-and-complexities/>
- Hearn. A., et al 2023 **"Technical solutions for hydrotreating"** Digital Refining Magazine.

- Hooke, J., et al., 2005 **"Energy Management Information Systems Achieving Improved Energy Efficiency"** A handbook for managers, engineers and operational staff. Published by the Office of Energy Efficiency of Natural Resources, Canada.
- Hoong, C., et al., 2016 **"Industry Energy Efficiency Technology Roadmap"** National Climate Change Secretariat (NCCS) and National Research Foundation (NRF)
- Huang, L., et al., 2025 **"Simultaneous Optimization of Hydrogen Network with Pressure Swing Absorption Based on Evolutionary Response Surface Method"** MDPI.
- IEA., 2025 **"Energy and AI"** International Energy Agency (IEA).
- Ibrahim, D., 2025 **"Heat-integrated process improvement of petroleum refinery FCC light-ends separation"** International Journal of Science and Research Archive,
- IPIECA, 2023 **"Saving energy in the oil and gas industry"** The global oil and gas industry association for environmental and social issues
- James, R., 2017 **"Steam Traps Management"** American Institute of Chemical Engineers-AIChE" Available at: www.Aiche.org/cep
- Jechura, J., 2015 **"Hydrogen from Natural Gas Via Steam Methane Reforming (SMR)"** Colorado school of Mines.
- Johra, N. 2010 **"Strategies for Producing Clean Fuel in Syrian Refining Sector"** paper presented at OAPEC/NOGA Joint Conference held in Bahrain, 25-27 October 2010.
- Kafrudi, E., et al., 2017 **"Environmental Effects and Economic Study on Flare Gas Recovery for Using as Fuel Gas or Feedstock"** Petroleum and Coal Magazine. February, 2017
- Kalinenko, K & Cavkov, M., 2021 **"Energy Efficiency & Sustainability in a Crude Oil Refinery"** Euroleum Consultants. EPC. Paper presented at ESF MENA - Energy & Sustainability Forum for the Middle East region held from 24th – 26th October 2021 in UAE.
- Kreijkes, M., Linde, C., & Nivard, M., 2018 **"Refinery 2050, Refining the Clean Molecule"** Clingendael International Energy Programme (CIEP).
- Lizot, M., et, al, 2023 **"Efficiency Analysis of Oil Refineries Using DEAWindow Analysis, Cluster Analysis, and Malmquist Productivity Index"** MDPI. Available at: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>
- Marimo, F., & Casadesus, M., 2017 **"Reasons to Adopt ISO:50001 Energy Management System"** Department of Economics and Business Management, International University of Catalonia, Barcelona, Spain.
- Marton, S., et, al., 2017 **"A Steam Utility Network Model for the Evaluation of Heat Integration Retrofits – A Case Study of an Oil Refinery"** Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Available at: <http://www.sdewes.org/jsdewes>
- Mani, V., 2025 **"Desalter optimization strategies"** Digital refining Magazine Feb 2025.
- MoPMR, 2022 **"Egyptian Petroleum Sector Energy Efficiency Strategy 2022-2035"** The Ministry of Petroleum and Mineral Resources. Available at: www.petroleum.gov.eg
- Morrison, F., 2014 **"Saving Energy with Cooling Towers"** ASHRAE JOURNAL. Available at: www.ashrae.org



- Narsimha Rao, G., 2015 “Energy Conservation Opportunities in Refineries: A case of BPCL, Kochi” Workshop on Energy Efficiency Enhancement in Refineries Under PAT Scheme.
- Nippon, 2013 “Reduction in Steam Losses from 100,000 Steam Traps” Nippon Petroleum Refining Company. The Energy Conservation Center, Japan.
- Picón-Núñez, M. et al., 2022 “Designing compact heat recovery systems to increase energy efficiency” Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.09.016>
- Rafeek, M., et al., 2025 "Sustainable Refining: Integrating Renewable Energy and Advanced Technologies" Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14673-z>
- Ramasamy, M., & Deshannavar, U., 2016 “Effect of Bulk Temperature and Heating Regime on Crude Oil Fouling” Chemical Engineering Department, University Technology Petronas, Malaysia.
- Rossiter, P., & Jones, P., 2015 “Energy Management and Efficiency for the Process Industries” A Joint Publication of the American Institute of Chemical Engineers and John Wiley & Sons, Inc.”
- Rodríguez, M., 2024 “Optimization of energy efficiency in industrial boilers” Available online at: <https://inspenet.com/en/articles/energy-efficiency-in-industrial-boilers/>
- Samuel, D., 2022 “Design of A smart Energy Management System For the Oil and Gas Industry”
- Shah, R., & Akhtar, R. 2024 “Critical Success Factors for Implementation of ISO 50001” International Journal of Engineering Works, Link: <https://www.ijew.io/pdfdownload/critical-success-factors-for-implementation-of-iso-50001>
- Shahin, M., et al., 2024 “Maximizing Energy Efficiency in Petroleum Refining: Case Study—Delayed Coker Unit in an Egyptian Refinery” Conference paper titled “Engineering Solutions Toward Sustainable Development”.
- Shi, X., et al., 2024 “A Study on the Promoting Role of Renewable Hydrogen in the Transformation of Petroleum Refining Pathways” MDPI
- Sladkovskiy, D., & Murzin, D., 2022 “Integrated Power Systems for Oil Refinery and Petrochemical Processes” MDPI <https://doi.org/10.3390/en15176418>
- SOLOMON, 2020 “World’s Best Refineries” Available at: <https://www.solomoninsight.com/industries/refining/worlds-best-refineries>
- Solomon, 2016 “Solomon Associates World’s Best Refineries” Available at: www.SolomonOnline.com
- Solomon, 2010 “EII Analysis Methodology, Gap Analysis VS World’s Best EII” Available at: www.solomononline.com
- Tawil, E., 2021 “Boiler Basics, Operation and Maintenance” www.cedengineering.com
- Variny, M., et al., 2024 The Valorization of a Crude Refinery’s By-Product: A Case Study on the Heavy Residue Gasifier” Engineering Proceeding. MDPI.
- Watson., M., 2015 “Robotic Convection Bank Cleaning” Paper prepared for Presentation at the 2015 Spring National Meeting, Austin, TX., April 26 – 30, 2015
- Wood, 2023 “Powering up: Pathways to Decarbonize Refining”
- Worley, 2024 refinery-of-the-future, Decarbonization Options. Worley consulting.



- Worrell, E., Corsten, M., & Galitsky, C. 2015 **"Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Petroleum Refineries"** Berkley LAN, environmental energy technologies division. Available at: <http://escholarship.org/uc/item/96m8d8gm>
- Zand, M., & Zakizadeh, M., 2024 **"Technology and Energy Management in Oil and Gas Industries"** ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication>
- Zein, S., et al., 2026 **"Integrated Preflash Drum Optimization for Energy Efficiency and Profitability in Crude Distillation Units"** Chemengineering Magazine.
- Zhou, Y.; Yang, M.; Wang, Y. 2026 **"Modeling and optimization of refinery hydrogen management system considering hydroprocessing mechanisms and constraints"** Chemical Engineering Science Magazine.