الوحدات التشغيلية في معامل تكرير البترول: تقرير فني شامل

مقدمة: نظرة شاملة على عمليات تكرير البترول

تُعد معامل تكرير البترول منشآت صناعية بالغة التعقيد، تمثل حلقة الوصل الحيوية بين حقول إنتاج النفط الخام والمستهلك النهائي. فالبترول الخام، بشكله المستخرج من باطن الأرض، هو خليط معقد من آلاف المركبات الهيدروكربونية، وهو عديم الفائدة تقريبًا في حالته الأولية.[1] تتمثل المهمة الأساسية للمصفاة في تحويل هذا الخليط إلى طيف واسع من المنتجات ذات القيمة الاقتصادية العالية والمواصفات الدقيقة، بدءًا من غاز البترول المسال ووقود السيارات، ومرورًا بوقود الطائرات والديزل، وانتهاءً بزيوت التشحيم والأسفلت.[4]

لا يمكن النظر إلى المصفاة كمجرد مجموعة من الوحدات المنفصلة، بل هي نظام متكامل ومترابط تعمل فيه كل وحدة بتناغم مع الوحدات الأخرى.[3] فمخرجات وحدة معينة غالبًا ما تكون المادة الخام (اللقيم) لوحدة تالية، كما أن المنتجات الثانوية لوحدة ما، مثل الهيدروجين، قد تكون مادة خام أساسية لوحدة أخرى. يوضح مخطط التدفق المبسط أدناه المسار العام للمواد الهيدروكربونية عبر الوحدات الرئيسية التي سيتم تناولها في هذا التقرير، مما يساعد على تصور موقع كل وحدة ودورها في المنظومة الكلية.

مخطط تدفق مبسط يوضح المسار العام للنفط الخام عبر الوحدات الرئيسية في المصفاة.6

يمكن تصنيف العمليات الجوهرية في المصفاة ضمن أربع فئات رئيسية تشكل الإطار العام لعملية التكرير [5]:

1. **الفصل (Separation):** وهي عمليات فيزيائية بحتة تعتمد على الخواص الطبيعية للمكونات، مثل الاختلاف في درجات الغليان (التقطير) أو القابلية للذوبان في مذيب معين (إزالة الأسفلت بالمذيبات).[8]
2. **التحويل (Conversion):** وهي عمليات كيميائية تهدف إلى تغيير التركيب الجزيئي للهيدروكربونات، إما عن طريق تكسير الجزيئات الكبيرة إلى جزيئات أصغر وأكثر قيمة (مثل التكسير الحفزي)، أو إعادة ترتيب بنيتها لتحسين خصائصها (مثل إعادة التشكيل الحفزي).[4]
3. **المعالجة (Treating):** وهي عمليات تنقية تهدف إلى إزالة الشوائب غير المرغوب فيها مثل مركبات الكبريت والنيتروجين والمعادن، والتي تضر بالبيئة وتسبب تآكل المعدات وتسمم العوامل الحفازة (مثل المعالجة الهيدروجينية).[2]
4. **المزج (Blending):** وهي المرحلة النهائية التي يتم فيها خلط التيارات الهيدروكربونية المختلفة من الوحدات السابقة بنسب دقيقة، مع إضافة بعض المواد المحسِّنة، للحصول على منتجات نهائية مطابقة للمواصفات التجارية والبيئية الصارمة.[4]

يهدف هذا التقرير إلى تقديم شرح فني مفصل لكل وحدة من الوحدات الرئيسية والمساندة في مصفاة تكرير حديثة، مع التركيز على وظيفتها، وسبب أهميتها، وموقعها ضمن التسلسل المنطقي لعمليات التكرير.

الجزء الأول: وحدات الفصل والمعالجة الأولية

تمثل هذه الوحدات نقطة البداية في رحلة تكرير النفط الخام، حيث يتم فيها فصله إلى مكوناته الأساسية بناءً على خصائصه الفيزيائية، وتجهيزه للمراحل اللاحقة الأكثر تعقيدًا.

1.1. وحدة إزالة الأملاح والمياه (Desalting Unit)

تُعتبر وحدة إزالة الأملاح والمياه خط الدفاع الأول وحارس البوابة للمصفاة بأكملها. فالنفط الخام القادم من حقول الإنتاج لا يكون نقيًا تمامًا، بل يحتوي على كميات متفاوتة من الماء (على شكل مستحلب)، وأملاح ذائبة في هذا الماء (بشكل أساسي كلوريدات الصوديوم، الكالسيوم، والمغنيسيوم)، بالإضافة إلى رواسب صلبة مثل الرمل والطمي.[14]

الوظيفة وسبب الاستخدام:
إن وجود هذه الشوائب يشكل خطرًا جسيمًا على سلامة وكفاءة عمليات المصفاة. عند درجات الحرارة المرتفعة في الأفران وأبراج التقطير، يمكن أن تترسب الأملاح على الأسطح الداخلية للمبادلات الحرارية والأنابيب، مكونة طبقة عازلة تُعرف بالقشور (Fouling)، مما يقلل بشكل كبير من كفاءة انتقال الحرارة ويزيد من استهلاك الوقود.16 الأخطر من ذلك، أن كلوريدات المغنيسيوم والكالسيوم تتحلل بالحرارة لتكوين حمض الهيدروكلوريك (HCl)، وهو حمض شديد التآكل يهاجم الأسطح المعدنية للمعدات، خاصة في الأجزاء العلوية من برج التقطير حيث يتكثف البخار.[2] لذا، فإن الوظيفة الأساسية لهذه الوحدة هي إزالة هذه الشوائب لحماية المعدات من التآكل والترسبات، ومنع تسمم العوامل الحفازة في الوحدات اللاحقة.[14]

إن كفاءة هذه الوحدة لها تأثير مباشر وممتد على التكاليف التشغيلية للمصفاة بأكملها. أي قصور في إزالة الأملاح (النسبة المستهدفة تتجاوز 99%) سيؤدي حتمًا إلى زيادة معدلات التآكل، مما يضطر المصفاة إلى استخدام سبائك معدنية أغلى ثمنًا في الوحدات اللاحقة، وزيادة وتيرة عمليات الصيانة الدورية (Turnaround) لتنظيف المعدات، وتقصير العمر التشغيلي للعوامل الحفازة الحساسة للمعادن. بالتالي، فإن الاستثمار في وحدة إزالة أملاح فعالة هو استثمار مباشر في موثوقية وسلامة المصفاة ككل.

آلية العمل:
تعتمد العملية على مبدأ الغسيل بالماء. يتم تسخين النفط الخام إلى حوالي 140 درجة مئوية لتقليل لزوجته، ثم يُحقن فيه ماء غسيل (Wash Water) "كاسر الاستحلاب" تُسمى (Demulsifier).15 مع مادة كيميائية خاصة يتم خلط المزيج بقوة باستخدام صمام خلط لضمان تلامس دقيق بين النفط والماء، مما يسمح للأملاح الذائبة بالانتقال من النفط إلى قطرات الماء. بعد ذلك، يدخل هذا المستحلب إلى وعاء فصل أفقي ضخم (Desalter Vessel). داخل هذا الوعاء، يتم تطبيق مجال كهربائي عالي الجهد عبر شبكة من الأقطاب (Electrostatic Grids). يعمل هذا المجال الكهربائي على استقطاب قطرات الماء الصغيرة، مما يسرّع من اندماجها معًا وتكوين قطرات أكبر تستقر بفعل الجاذبية في قاع الوعاء، حاملة معها الأملاح والرواسب. يتم سحب طبقة الماء المالح (Brine) من الأسفل، بينما يخرج النفط الخام النظيف والمعالج من الأعلى ليتجه إلى وحدة التقطير الجوي.16

1.2. وحدة التقطير الجوي (Atmospheric Distillation Unit - CDU)

إذا كانت وحدة إزالة الأملاح هي حارس البوابة، فإن وحدة التقطير الجوي هي قلب المصفاة النابض.[20] هي الوحدة الأولى التي يتم فيها

الفصل الفعلي لمكونات النفط الخام إلى أجزاء أو "مقطرات" (Fractions/Cuts) مختلفة، وهي العملية الأكثر أهمية في أي مصفاة.[2]

الوظيفة وسبب الاستخدام:
تعتمد هذه الوحدة على مبدأ فيزيائي بسيط وهو أن المكونات المختلفة في خليط السوائل تغلي عند درجات حرارة مختلفة. وظيفتها الأساسية هي فصل النفط الخام إلى مجموعات من الهيدروكربونات ذات نطاقات غليان متقاربة.22 هذا الفصل ضروري لأن كل وحدة معالجة لاحقة في المصفاة مصممة للتعامل مع نوع معين من الهيدروكربونات ضمن نطاق غليان محدد.

آلية العمل:
بعد خروجه من وحدة إزالة الأملاح، يمر النفط الخام عبر شبكة معقدة من المبادلات الحرارية حيث يكتسب حرارة من منتجات المصفاة الساخنة، ثم يدخل إلى فرن ضخم يتم فيه تسخينه إلى درجة حرارة تتراوح بين 350 و 400 درجة مئوية.8 عند هذه الدرجة، يتبخر جزء كبير من النفط. يُضخ هذا الخليط الساخن، المكون من سائل وبخار، إلى الجزء السفلي من برج تقطير عملاق قد يصل ارتفاعه إلى 60 مترًا، في منطقة تُعرف بـ "منطقة الوميض" (Flash Zone).25

بمجرد دخولها البرج، تبدأ الأبخرة الأخف (ذات درجة الغليان المنخفضة) في الصعود نحو قمة البرج، بينما تستقر السوائل الأثقل (ذات درجة الغليان المرتفعة) في القاع.[22] يحتوي البرج من الداخل على عشرات الصواني (Trays) أو طبقات من الحشوات (Packing).[26] أثناء صعود البخار، يبرد تدريجيًا ويتكثف على هذه الصواني عند مستويات مختلفة. في نفس الوقت، يتدفق جزء من السائل المتكثف من الصواني العلوية إلى الصواني السفلية (يُعرف بالراجع أو Reflux)، مما يؤدي إلى تبريد البخار الصاعد وإعادة تبخير المكونات الأخف من السائل النازل. هذا التلامس المستمر بين البخار الصاعد والسائل النازل على كل صينية يضمن عملية فصل دقيقة وفعالة.[28] يتم سحب المنتجات المختلفة كسوائل من صواني محددة على ارتفاعات مختلفة من البرج، حيث تكون درجة الحرارة مناسبة لتكثف كل منتج.[12]

المنتجات الرئيسية:
يتم فصل النفط الخام في برج التقطير الجوي إلى عدة مقطرات رئيسية، مرتبة من الأعلى (الأخف والأقل درجة غليان) إلى الأسفل (الأثقل والأعلى درجة غليان)، كما هو موضح في الجدول التالي.

جدول 1: المنتجات الرئيسية لبرج التقطير الجوي ونطاقات غليانها التقريبية

المنتج	نطاق درجة الغليان التقريبية (°C)	الاستخدامات الأولية أو الوحدة اللاحقة
غازات التكرير (Refinery Gases)	أقل من 40	نظام غاز الوقود، إنتاج غاز البترول المسال (LPG)
النافثا الخفيفة (Light Naphtha)	40 - 90	وحدة الأزمرة (Isomerization)، مزج البنزين
النافثا الثقيلة (Heavy Naphtha)	90 - 190	وحدة إعادة التشكيل الحفزي (CCR) لإنتاج البنزين
الكيروسين (Kerosene)	190 - 250	وحدة المعالجة الهيدروجينية (KHT) لإنتاج وقود الطائرات
زيت الغاز الخفيف (LGO) / الديزل	250 - 350	وحدة المعالجة الهيدروجينية (DHT) لإنتاج وقود الديزل

المتبقي الجوي (Atmospheric Residue)	أعلى من 350	لقيم لوحدة التقطير التفريغي (VDU)

(المصادر: [12])

1.3. وحدة التقطير التفريغي (Vacuum Distillation Unit - VDU)

المتبقي الجوي الذي يخرج من قاع برج التقطير الجوي هو سائل أسود كثيف ولزج، يحتوي على أثقل الجزيئات الهيدروكربونية الموجودة في النفط الخام.[33] هذه الجزيئات، مثل زيوت التشحيم الثقيلة ومكونات الأسفلت، لها درجات غليان عالية جدًا تتجاوز 370 درجة مئوية.[33]

الوظيفة وسبب الاستخدام:

محاولة فصل هذه المكونات الثقيلة عن طريق زيادة درجة الحرارة فوق 400 درجة مئوية في برج تقطير آخر عند الضغط الجوي وهي عملية غير مرغوبة ،(Thermal Cracking) ستكون كارثية. فالحرارة العالية ستؤدي إلى تكسير هذه الجزيئات الكبيرة حراريًا والغازات الخفيفة، مما يؤدي إلى إهدار المنتجات (Coke) في هذه المرحلة، حيث تتحول إلى منتجات منخفضة القيمة مثل فحم الكوك القيمة وتلف المعدات.33

الحل يكمن في استغلال مبدأ فيزيائي أساسي: درجة غليان السائل تنخفض بانخفاض الضغط الواقع عليه.[29] وظيفة وحدة التقطير التفريغي هي إجراء عملية التقطير عند ضغط منخفض جدًا (تفريغ)، مما يسمح للمكونات الثقيلة بالغليان والتبخر عند درجات حرارة أقل بكثير من درجات حرارة تكسيرها، وبالتالي يمكن فصلها بأمان وكفاءة.[3]

إن وجود هذه الوحدة يمثل نقطة تحول استراتيجية في قدرة المصفاة على تحقيق الربحية. المصافي البسيطة قد تبيع المتبقي الجوي مباشرة كزيت وقود ثقيل (Fuel Oil)، وهو منتج تتناقص قيمته والطلب عليه عالميًا. أما المصافي المعقدة، فتستخدم وحدة التقطير التفريغي لاستخلاص أقصى قيمة ممكنة من "قاع البرميل" (Bottom of the Barrel). المنتجات المستخلصة من هذه الوحدة تُعد لقيماً ذا قيمة عالية لوحدات التحويل المتقدمة، مما يسمح للمصفاة بزيادة إنتاجها من وقود النقل عالي الطلب مثل البنزين والديزل، وبالتالي تعظيم أرباحها بشكل كبير.

آلية العمل:

مرة أخرى في فرن، ثم يُضخ إلى برج التقطير التفريغي.21 هذا البرج أكبر قطرًا من برج CDU يتم تسخين المتبقي الجوي من وحدة التقطير الجوي للسماح للأبخرة بالتمدد عند الضغط المنخفض. يتم الحفاظ على الضغط المنخفض داخل البرج (أقل بكثير من الضغط ومكثفات.33 تعمل هذه القاذفات على سحب الغازات (Steam Ejectors) الجوي) باستخدام نظام تفريغ، يتكون عادةً من قاذفات بخار .غير المتكثفة من قمة البرج، مما يخلق حالة من التفريغ المستمر

المنتجات الرئيسية:

1. **زيت الغاز التفريغي (Vacuum Gas Oil - VGO):** يتم سحبه من الأجزاء العلوية والوسطى من البرج. وهو سائل يشبه الزيت، ويعتبر لقيماً مثالياً لوحدات التكسير مثل وحدة التكسير الحفزي المائع (FCC) أو وحدة التكسير الهيدروجيني Hydrocracker).[36])
2. **المتبقي التفريغي (Vacuum Residue):** وهو أثقل منتج سائل في المصفاة، يخرج من قاع البرج. يستخدم كلقيم لوحدات التفحيم المتأخر (Delayed Coker)، أو وحدة إزالة الأسفلت بالمذيبات (SDA)، أو في إنتاج الأسفلت المستخدم في رصف الطرق.[37]

الجزء الثاني: وحدات تحسين جودة وقود البنزين

بعد فصل النفط الخام، تكون المقطرات الناتجة، خاصة النافثا، غير صالحة للاستخدام المباشر كوقود سيارات حديث. فهي تحتوي على شوائب ضارة ولها رقم أوكتاني منخفض، مما يسبب "طرق" أو "فرقعة" (Knocking) في المحرك. تهدف الوحدات في هذا الجزء إلى معالجة هذه المشاكل ورفع جودة البنزين.

2.1. وحدة المعالجة الهيدروجينية للنافثا (Naphtha Hydrotreater - NHT)

تُعتبر هذه الوحدة بمثابة "حارس" أو "وحدة حماية" للوحدة التي تليها، وهي وحدة إعادة التشكيل الحفزي (CCR).

الوظيفة وسبب الاستخدام:

النافثا الثقيلة القادمة من وحدة التقطير الجوي، والتي ستُستخدم لإنتاج البنزين عالي الأوكتان، تحتوي على شوائب مثل مركبات الكبريت، النيتروجين، والأكسجين.40 هذه الشوائب، وخاصة الكبريت، تعتبر "سمومًا" قاتلة للعامل الحفاز البلاتيني النبيل والمكلف جدًا المستخدم في وحدة CCR.42 تسمم العامل الحفاز "ترتبط هذه السموم بسطح العامل الحفاز وتفقده نشاطه بشكل دائم، وهي عملية تُعرف بـ (Catalyst Poisoning).44 لذلك، فإن الوظيفة الحيوية لوحدة NHT هي إزالة هذه الشوائب بشكل شبه كامل لحماية استثمار CCR 45 المصفاة في العامل الحفاز البلاتيني وضمان عمل وحدة بكفاءة عالية وعمر تشغيلي طويل.

إن وجود وحدة NHT يوضح مبدأ التكامل العميق في تصميم المصافي؛ فهي وحدة "خدمية" لوحدة CCR، حيث أن وجودها مبرر فقط لحماية استثمار أكبر وأكثر أهمية. هذا يبرز كيف يتم بناء وحدات كاملة لخدمة وحماية وحدات أخرى، مما يشكل سلسلة مترابطة من العمليات التي يعتمد نجاح كل حلقة فيها على الحلقة التي تسبقها.

آلية العمل:

تشبه العملية إلى حد كبير عمليات المعالجة الهيدروجينية الأخرى. يتم ضغط النافثا وخلطها مع تيار غني بالهيدروجين، ثم يتم تسخين المزيج وتمريره عبر مفاعل ذي طبقة ثابتة (Fixed-Bed Reactor) يحتوي على عامل حفاز، عادة ما يكون من الكوبالت-موليبدينوم (Co–Mo) أو النيكل-موليبدينوم (Ni–Mo) محمل على الألومينا.41 في هذه الظروف، يتفاعل الكبريت مع الهيدروجين مكونًا غاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، ويتفاعل النيتروجين مكونًا الأمونيا (NH_3). يتم بعد ذلك تبريد المزيج وفصل الغازات (الهيدروجين الزائد و H_2S و NH_3) عن النافثا النظيفة، والتي تصبح جاهزة لإرسالها إلى وحدة CCR.[2]

2.2. وحدة إعادة التشكيل الحفزي المستمر (Continuous Catalytic Reforming - CCR)

هذه الوحدة هي المسؤولة عن التحويل الكيميائي الأهم لإنتاج مكونات البنزين عالية الجودة، كما أنها تلعب دورًا استراتيجيًا آخر في اقتصاديات المصفاة.

الوظيفة وسبب الاستخدام:

تتكون بشكل أساسي من هيدروكربونات بارافينية (سلاسل مستقيمة) ونافثينية (حلقية NHT النافثا الثقيلة المعالجة التي تخرج من وحدة CCR هي مشبعة) ذات رقم أوكتاني منخفض (حوالي 40-60)، مما يجعلها غير صالحة للاستخدام كوقود سيارات.47 وظيفة وحدة إعادة ترتيب التركيب الجزيئي لهذه الهيدروكربونات وتحويلها إلى مركبات أروماتية (حلقية غير مشبعة مثل البنزين، التولوين، والزايلين) هو المكون الأساسي ،(Reformate) "التي تتميز برقم أوكتاني مرتفع جدًا (أكثر من 100).47 المنتج الرئيسي، المسمى "الريفورميت والأكثر قيمة في مزيج البنزين النهائي.47

آلية العمل:

تتم العملية في سلسلة من المفاعلات عند درجات حرارة عالية (حوالي 500-525 درجة مئوية) وضغط منخفض نسبيًا، بوجود عامل حفاز ثنائي المعدن (عادة بلاتين-رينيوم) محمل على الألومينا.48 التفاعلات الرئيسية هي تفاعلات نزع الهيدروجين (Dehydrogenation)، وهي تفاعلات ماصة للحرارة بشدة، لذا يتم إعادة تسخين تيار العملية في أفران بين المفاعلات. في أنظمة CCR الحديثة، لا يتم إيقاف الوحدة لتجديد العامل الحفاز. بدلاً من ذلك، يتدفق العامل الحفاز ببطء وبشكل مستمر من المفاعل العلوي إلى المفاعل السفلي (Regenerator)، ثم يتم سحبه إلى برج تجديد منفصل حيث يتم حرق فحم الكوك المترسب عليه بعناية، ثم يعاد تنشيطه وإعادته إلى المفاعل العلوي. هذا يسمح للوحدة بالعمل لسنوات دون توقف.47

إن الدور المزدوج لوحدة CCR يجعلها مركزًا عصبيًا في المصفاة. فهي ليست مجرد مصنع للبنزين، بل هي "مصنع الهيدروجين" الرئيسي للمصفاة.[49] الهيدروجين الناتج عن تفاعلات نزع الهيدروجين ليس منتجًا ثانويًا، بل هو مادة خام حيوية وضرورية لجميع عمليات المعالجة الهيدروجينية الأخرى (NHT, DHT, KHT, Hydrocracking) التي تهدف إلى الامتثال للمواصفات البيئية.[50] هذا يخلق علاقة تكافلية معقدة: لإنتاج ديزل نظيف، تحتاج المصفاة إلى هيدروجين، والذي يأتي بشكل أساسي من إنتاج البنزين عالي الأوكتان. إدارة "ميزان الهيدروجين" (Hydrogen Balance) في المصفاة هي واحدة من أهم التحديات التشغيلية والاقتصادية، وتتطلب استخدام نماذج تحسين متقدمة لاتخاذ قرارات دقيقة حول كيفية تشغيل كل وحدة لتحقيق أقصى ربحية ممكنة.

2.3. وحدة الأزمرة (Isomerization Unit)

بينما تعالج وحدة CCR النافثا الثقيلة، تختص وحدة الأزمرة بمعالجة النافثا الخفيفة (التي تحتوي على 5 و 6 ذرات كربون).

الوظيفة وسبب الاستخدام:

لها رقم أوكتاني منخفض ،(n-hexane) والهكسان العادي (n-pentane) النافثا الخفيفة، المكونة بشكل أساسي من البنتان العادي (حوالي 60-70).46 وظيفة وحدة الأزمرة هي رفع رقمها الأوكتاني عن طريق تحويل هذه الجزيئات ذات السلسلة المستقيمة إلى هذه الجزيئات المتفرعة لها 3.(iso-hexane) والأيزوهكسان (iso-pentane) مثل الأيزوبنتان ،(isomers) نظائرها المتفرعة نفس عدد ذرات الكربون والهيدروجين، ولكن ترتيبها الفراغي مختلف، مما يمنحها رقمًا أوكتانيًا أعلى بكثير (حوالي 85-90).46 هو مكون مزج بنزين ممتاز لأنه يرفع الأوكتان دون زيادة محتوى المركبات ،(Isomerate) "المنتج، المسمى "الأيزومريت الأروماتية (مثل البنزين) أو الأوليفينات، مما يساعد المصفاة على تلبية المواصفات البيئية الصارمة.53

تُعد وحدة الأزمرة مثالًا ممتازًا على كيفية تلبية المصفاة لمواصفات منتج قد تبدو متضاربة. فبينما ترفع وحدة CCR الأوكتان عن طريق إنتاج الأروماتيات، تفرض اللوائح البيئية قيودًا صارمة على نسبة مركب البنزين في الوقود النهائي لكونه مادة مسرطنة. توفر وحدة الأزمرة وسيلة "نظيفة" لرفع الأوكتان دون إنتاج المزيد من البنزين. هذا يمنح المصفاة مرونة حاسمة في عملية المزج النهائية، مما يمكنها من تحقيق التوازن الدقيق بين متطلبات الأداء العالي (رقم الأوكتان) والالتزام بالمعايير البيئية الصارمة.

آلية العمل:

تتم العملية عند درجات حرارة منخفضة نسبيًا (120-180 درجة مئوية) وبوجود عامل حفاز متخصص، غالبًا ما يكون من البلاتين المحمل على الألومينا المعالجة بالكلور أو على الزيوليت.55 يتم تنفيذ التفاعل في وجود الهيدروجين، الذي لا يشارك في تفاعل الأزمرة الرئيسي ولكنه يلعب دورًا حيويًا في قمع التفاعلات الجانبية ومنع ترسب فحم الكوك على العامل الحفاز، مما يطيل من عمره التشغيلي.46

الجزء الثالث: وحدات معالجة المقطرات الوسطى والثقيلة

تركز هذه الوحدات على تحسين جودة المنتجات الأثقل من البنزين، مثل وقود الطائرات والديزل، بالإضافة إلى معالجة أثقل المكونات في النفط الخام.

3.1. وحدات المعالجة الهيدروجينية للكيروسين (KHT) والديزل (DHT)

هاتان الوحدتان متشابهتان في المبدأ مع وحدة NHT ولكن لكل منهما هدف محدد.

الوظيفة وسبب الاستخدام:
الكيروسين والديزل الخام (زيت الغاز الخفيف) القادمان من وحدة التقطير الجوي يحتويان على مستويات عالية من الكبريت تتجاوز بكثير الحدود التي تسمح بها المعايير البيئية العالمية.57 عند احتراق الوقود المحتوي على الكبريت، يتم إطلاق غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO2)، وهو المسبب الرئيسي للأمطار الحمضية ومشاكل الجهاز التنفسي.[59]

- **وحدة KHT (Kerosene Hydrotreater):** وظيفتها الرئيسية هي إزالة الكبريت من مقطر الكيروسين لإنتاج وقود طائرات (Jet Fuel) مطابق للمواصفات الصارمة للطيران، والتي تتطلب أيضًا تحسين خصائص أخرى مثل "نقطة الدخان" (Smoke Point) والاستقرار الحراري.[60]
- **وحدة DHT (Diesel Hydrotreater):** وظيفتها هي إزالة الكبريت بشكل عميق من مقطر الديزل لإنتاج وقود ديزل منخفض الكبريت (LSD) أو فائق الانخفاض (ULSD)، والذي يجب أن يحتوي على أقل من 15 جزءًا في المليون (ppm) من الكبريت وفقًا للوائح في معظم أنحاء العالم.[21] كما تحسن العملية من "رقم السيتان" (Cetane Number)، وهو مقياس لجودة اشتعال الديزل.[64]

إن تطور تقنية المعالجة الهيدروجينية للديزل (DHT) مرتبط بشكل مباشر بتطور التشريعات البيئية. في الماضي، كانت هذه الوحدات تعمل عند ضغوط منخفضة نسبيًا وكانت تهدف فقط إلى خفض الكبريت إلى مستويات معينة. ولكن مع فرض مواصفات ULSD الصارمة، اضطرت المصافي إلى بناء وحدات جديدة أو تحديث الوحدات القائمة لتعمل عند ضغوط وظروف تشغيلية أشد قسوة، وباستخدام عوامل حفازة أكثر تطورًا. هذا التطور، الذي كان مدفوعًا بالكامل بالسياسات البيئية، أدى إلى زيادة كبيرة في التكاليف الرأسمالية والتشغيلية، وزاد من الطلب على الهيدروجين داخل المصفاة بشكل كبير.[59]

آلية العمل:
يتم خلط اللقيم (كيروسين أو ديزل) مع الهيدروجين تحت ضغط وحرارة .NHT. العملية متطابقة تقريبًا في كلتا الوحدتين وتشبه وحدة Co-Mo).50 أو كوبالت-موليبدينوم Ni-Mo عاليين، ثم يتم تمريره عبر مفاعل يحتوي على عامل حفاز (عادةً نيكل-موليبدينوم) يتفاعل الكبريت مع الهيدروجين لتكوين كبريتيد الهيدروجين
H2S)، والذي يتم فصله لاحقًا في نظام الفصل.

3.2. وحدة ميروكس (MEROX - Mercaptan Oxidation)

تقدم وحدة ميروكس نهجًا مختلفًا وأكثر اقتصادية لمعالجة بعض الشوائب الكبريتية.

الوظيفة وسبب الاستخدام:
تُستخدم هذه الوحدة بشكل أساسي لمعالجة المنتجات الخفيفة مثل غاز البترول المسال (LPG)، والنافثا الخفيفة، والكيروسين. تحتوي هذه المنتجات على نوع معين من المركبات الكبريتية يُعرف باسم "الميركابتانات" (Mercaptans, R-SH). هذه المركبات ليست فقط ذات رائحة كريهة ونفاذة (وهي المادة التي تضاف للغاز الطبيعي للكشف عن التسرب)، بل هي أيضًا حمضية وتسبب تآكلًا للمعادن.68 بدلاً من عملية الإزالة الكاملة للكبريت (Desulfurization) التي تتطلب هيدروجينًا وظروفًا قاسية، تقوم وحدة ميروكس بعملية "تحلية" (Sweetening).[61] في هذه العملية، لا يتم إزالة ذرة الكبريت من المنتج، بل يتم تحويل الميركابتانات الحمضية والمسببة للتآكل إلى مركبات "ثاني الكبريتيد" (Disulfides, R-S-S-R)، وهي مركبات متعادلة، أقل رائحة، وغير مسببة للتآكل.[68] بالتالي، يبقى المحتوى الكلي للكبريت في المنتج كما هو، ولكن يتم تحويله إلى شكل كيميائي مقبول.[71]

إن وجود وحدة ميروكس في المصفاة هو نتيجة لقرار اقتصادي بحت. فهي تمثل حلاً منخفض التكلفة لمعالجة المنتجات الخفيفة التي لا تتطلب إزالة كاملة للكبريت بموجب مواصفاتها النهائية. بناء وتشغيل وحدة ميروكس أرخص بكثير من وحدة المعالجة الهيدروجينية، لأنها تعمل عند ضغط وحرارة منخفضين ولا تستهلك الهيدروجين باهظ الثمن. لذلك، إذا كانت مواصفات المنتج تسمح بوجود كبريت غير ميركابتاني، فإن عملية التحلية هي الخيار الأكثر جدوى اقتصاديًا.[70]

آلية العمل:
تعتمد العملية على أكسدة الميركابتانات. يتم تمرير المنتج المراد معالجته عبر طبقة من عامل حفاز صلب (عادةً فحم منشط مشبع بمركب خاص) في وجود الهواء (كمصدر للأكسجين) وبيئة قلوية يتم توفيرها عن طريق حقن كمية صغيرة من محلول الصودا الكاوية (NaOH).69 يتفاعل الميركابتان مع الأكسجين على سطح العامل الحفاز لتكوين ثاني الكبريتيد والماء.

3.3. وحدة إزالة الأسفلت بالمذيبات (Solvent Deasphalting - SDA)

تتعامل هذه الوحدة مع أثقل تيار في المصفاة، وهو المتبقي التفريغي، وتفصله بناءً على قابلية الذوبان بدلاً من درجة الغليان.

الوظيفة وسبب الاستخدام:
المتبقي التفريغي (Vacuum Residue) هو تيار غني بالجزيئات المعقدة والثقيلة المعروفة باسم "الأسفلتينات" (Asphaltenes). هذه الأسفلتينات تحتوي على تركيز عالٍ جدًا من الملوثات مثل المعادن (النيكل والفاناديوم)، الكبريت، والنيتروجين، بالإضافة إلى ميلها الشديد لتكوين فحم الكوك عند تسخينها.73 إدخال هذا التيار مباشرة إلى وحدات التكسير الحفزي سيؤدي إلى تسمم العامل الحفاز وتلفه في غضون ساعات.

وظيفة وحدة SDA هي فصل هذا المتبقي الثقيل إلى تيارين: تيار قيم يمكن معالجته لاحقًا، وتيار يتركز فيه معظم الملوثات.[75] يتم ذلك باستخدام مذيب هيدروكربوني خفيف (مثل البروبان، البيوتان، أو البنتان). هذا المذيب له خاصية فريدة: فهو يذيب الجزيئات الهيدروكربونية المرغوبة (البارافينية والأروماتية)، ولكنه لا يذيب الأسفلتينات الثقيلة، مما يؤدي إلى ترسيبها.[73]

تعتبر وحدة SDA تقنية تمكينية (Enabling Technology) حقيقية، فهي تمنح المصفاة القدرة على معالجة أنواع النفط الخام الثقيلة والحامضة، والتي تكون عادةً أرخص سعرًا في السوق العالمية. بدون هذه الوحدة، سيكون من الصعب والمكلف للغاية الاستفادة من المتبقي التفريغي لهذه الأنواع من النفط. من خلال "تنظيف" جزء من هذا المتبقي وتحويله إلى لقيم عالي الجودة، تفتح وحدة SDA الباب

أمام مرونة أكبر في اختيار أنواع النفط الخام، مما يمكن أن يحسن اقتصاديات المصفاة بشكل كبير. إنها أداة متقدمة لـ "إدارة الجزيئات" (Molecular Management)، حيث توجه الجزيئات الجيدة (DAO) إلى وحدات التحويل عالية القيمة، بينما تعزل الجزيئات السيئة (Pitch) ليتم التعامل معها في وحدات أقل حساسية مثل وحدة التفحيم.[73]

المنتجات الرئيسية:

1. **الزيت منزوع الأسفلت (Deasphalted Oil - DAO):** هو الجزء الذي يذوب في المذيب. وهو سائل عالي الجودة، منخفض المحتوى من المعادن والكربون، وغني بالهيدروجين نسبيًا. يُعتبر DAO لقيماً ممتازاً لوحدات التكسير الحفزي (FCC) أو التكسير الهيدروجيني (Hydrocracker) لإنتاج المزيد من البنزين والديزل.[75]
2. **القطران (Pitch):** هو الجزء الذي لم يذب وترسب. وهو مادة صلبة أو شبه صلبة، سوداء اللون، تحتوي على تركيز عالٍ من الأسفلتينات والمعادن. يمكن إرسال القطران إلى وحدة التفحيم المتأخر لإنتاج فحم الكوك، أو استخدامه في مزيج زيت الوقود الثقيل، أو في إنتاج الأسفلت المستخدم في رصف الطرق.[73]

الجزء الرابع: الوحدات البيئية والخدمات المساندة

تعتبر هذه الوحدات ضرورية لضمان تشغيل المصفاة بشكل آمن ومستدام ومتوافق مع اللوائح البيئية، بالإضافة إلى تحقيق أقصى استفادة من الطاقة.

4.1. وحدة معالجة الغازات الحامضية بالأمين (Amine Treating Unit)

تنتج العديد من وحدات المصفاة، خاصة وحدات المعالجة الهيدروجينية والتكسير، تيارات غازية تحتوي على مركبات حامضية وسامة، أهمها كبريتيد الهيدروجين (H2S) وثاني أكسيد الكربون (CO2).[82] يُطلق على هذه الغازات اسم "الغازات الحامضية" (Sour Gases).

الوظيفة وسبب الاستخدام:
لا يمكن إطلاق هذه الغازات في الغلاف الجوي بسبب سميتها الشديدة، كما لا يمكن حرقها مباشرة في نظام وقود المصفاة لأنها تسبب تآكلًا شديدًا وتنتج ملوثات بيئية (مثل SO2). وظيفة هذه الوحدة هي "تحلية" (Sweetening) هذه التيارات الغازية عن طريق إزالة H2S بشكل انتقائي.82 CO2 و

آلية العمل:
حيث يتلامس بشكل ،(Absorber) تعتمد العملية على الامتصاص الكيميائي. يتم تمرير الغاز الحامضي من أسفل برج الامتصاص يتدفق من أعلى (Diethanolamine - DEA أو Monoethanolamine - MEA معاكس مع محلول مائي من الأمين (مثل الخالي من الشوائب، من قمة البرج ،(Sweet Gas) "البرج.82 يتفاعل الأمين مع الغازات الحامضية ويمتصها. يخرج الغاز "الحلو .ليتم إرساله إلى نظام غاز الوقود. أما محلول الأمين، الذي أصبح الآن "غنيًا" بالغازات الحامضية، فيتم سحبه من قاع البرج

يُضخ الأمين الغني إلى برج آخر يسمى برج التجريد (Stripper أو Regenerator). في هذا البرج، يتم تسخين الأمين باستخدام البخار، مما يعكس التفاعل الكيميائي ويؤدي إلى تحرير الغازات الحامضية التي تخرج من قمة البرج كتيار مركز. أما الأمين "الفقير" (Lean Amine)، بعد تجديده، فيتم تبريده وإعادة ضخه إلى برج الامتصاص في دورة مغلقة ومستمرة.[83]

تعمل وحدة معالجة الأمين بالتعاون مع وحدة استرجاع الكبريت (Claus Unit) كمركز بيئي متكامل للمصفاة. فهما لا تنتجان منتجات نهائية ذات قيمة اقتصادية عالية (باستثناء الكبريت)، ولكنهما ضروريتان لتمكين جميع الوحدات الأخرى من العمل بشكل قانوني وآمن. تقومان بتجميع "نفايات" الكبريت من جميع أنحاء المصفاة وتحويلها من ملوث غازي خطير (H2S) إلى منتج ثانوي صلب ومستقر وقابل للتسويق (كبريت عنصري). هذا يوضح كيف أن الامتثال البيئي ليس مجرد تكلفة إضافية، بل هو جزء لا يتجزأ من التصميم الهندسي والتشغيلي للمصفاة الحديثة.[87]

4.2. نظام غاز الوقود (Fuel Gas System)

تستهلك المصافي كميات هائلة من الطاقة لتشغيل أفرانها وسخاناتها وغلاياتها. ولتحقيق الكفاءة الاقتصادية، تعتمد المصافي على نفسها لتوفير جزء كبير من هذا الوقود.

الوظيفة وسبب الاستخدام:

تنتج العديد من وحدات التكرير (مثل التقطير، التكسير، وإعادة التشكيل) كميات من الغازات الهيدروكربونية الخفيفة (الميثان، الإيثان، مما يعد إهدارًا للطاقة وتلويثًا للبيئة، يقوم نظام ،(Flare) البروبان، والبيوتان) كمنتجات ثانوية.89 بدلاً من حرق هذه الغازات في الشعلة غاز الوقود بجمعها ومعالجتها وتوزيعها كوقود داخل المصفاة.90

المكونات وآلية العمل:

Fuel Gas Knock-out) يتكون النظام من شبكة أنابيب تقوم بتجميع الغازات من مختلف الوحدات وتوجيهها إلى وعاء فصل كبير وظيفة هذا الوعاء هي إزالة أي قطرات سائلة قد تكون محمولة مع الغاز، والتي يمكن أن تسبب مشاكل في الاحتراق.89 بعد .(Drum ذلك، يتم ضغط الغاز إلى ضغط مناسب وتوزيعه عبر شبكة أخرى على جميع المستهلكين في المصفاة (الأفران، الغلايات، إلخ). غالبًا ما يتم تمرير الغازات الحامضية أولاً عبر وحدة معالجة بالأمين قبل دخولها نظام غاز الوقود.92

يمثل نظام غاز الوقود مثالًا حيًا على كفاءة استخدام الموارد وتحقيق الاقتصاد الدائري داخل المصفاة. فهو يحول ما كان يمكن أن يكون منتجًا ثانويًا منخفض القيمة أو حتى نفايات إلى مصدر طاقة أساسي، مما يقلل بشكل كبير من التكاليف التشغيلية عن طريق تقليل الاعتماد على شراء وقود خارجي مثل الغاز الطبيعي.

الجزء الخامس: وحدات المرافق والخدمات (Utilities)

على الرغم من أنها لا تعالج الهيدروكربونات بشكل مباشر، إلا أن هذه الوحدات تشكل العمود الفقري الذي يدعم جميع العمليات في المصفاة. أي خلل في هذه الأنظمة يمكن أن يؤدي إلى توقف المصفاة بأكملها.

5.1. أنظمة مياه التبريد (Cooling Water Systems)

تولد العمليات الكيميائية والفيزيائية في المصفاة كميات هائلة من الحرارة. هذه الحرارة يجب إزالتها بكفاءة لتبريد المنتجات النهائية،

وتكثيف الأبخرة في أبراج التقطير، والتحكم في درجات حرارة المفاعلات الكيميائية.[93]

الوظيفة وآلية العمل:
يعمل نظام مياه التبريد في دورة مغلقة. يتم ضخ المياه الباردة من حوض كبير عبر شبكة واسعة من الأنابيب إلى المبادلات الحرارية في جميع أنحاء المصفاة. في هذه المبادلات، تمتص المياه الحرارة من تيارات العمليات الساخنة. تعود المياه الساخنة بعد ذلك إلى أبراج التبريد لزيادة مساحة سطحها. في (Fill) في هذه الأبراج الشاهقة، يتم رش المياه الساخنة على طبقات من الحشوات .(Cooling Towers) نفس الوقت، تقوم مراوح ضخمة بسحب الهواء من أسفل البرج إلى أعلاه. يؤدي هذا التلامس بين الماء والهواء إلى تبخر جزء صغير من الماء. عملية التبخر هذه تستهلك كمية كبيرة من الطاقة الحرارية (الحرارة الكامنة للتبخر)، مما يؤدي إلى تبريد الجزء الأكبر من الماء الذي لم يتبخر. يتجمع الماء المبرد في الحوض أسفل البرج ليتم إعادة ضخه مرة أخرى إلى المصفاة، وهكذا تستمر الدورة.94

5.2. وحدة إنتاج المياه منزوعة المعادن (Demineralization Unit)

تحتاج المصفاة إلى كميات كبيرة من البخار لأغراض متعددة، مثل تسخين العمليات، وتجريد المقطرات في أبراج التقطير، وتشغيل التوربينات البخارية لتوليد الكهرباء أو تشغيل المضخات والضواغط الكبيرة. يتم إنتاج هذا البخار في غلايات صناعية ضخمة .(Boilers)

الوظيفة وسبب الاستخدام:
استخدام المياه العادية (مياه الصنبور أو مياه الأنهار) مباشرة في الغلايات يسبب مشاكل خطيرة. فالأملاح الذائبة في الماء، خاصة أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم، تترسب عند درجات الحرارة العالية على الأسطح الداخلية لأنابيب الغلاية، مكونة طبقة صلبة من القشور هذه الطبقة تعمل كعازل حراري، مما يقلل من كفاءة الغلاية ويزيد من استهلاك الوقود. والأخطر من ذلك، أنها قد تسبب 96.(Scale) ارتفاعًا مفرطًا في درجة حرارة المعدن وتؤدي إلى انفجار الأنابيب. لذلك، فإن وظيفة هذه الوحدة هي إزالة جميع الأملاح والأيونات صالحة لتغذية الغلايات.98 ،(Demineralized Water) المعدنية الذائبة من المياه لإنتاج مياه عالية النقاوة
آلية العمل:
يتم تمرير المياه الخام أولاً عبر وعاء يحتوي على "راتنج التبادل .(Ion Exchange) تعتمد التقنية الأكثر شيوعًا على التبادل الأيوني يقوم هذا الراتنج بامتصاص جميع الأيونات الموجبة (الكاتيونات) مثل الكالسيوم .(Cation Exchange Resin) "الكاتيوني بعد ذلك، تمر المياه عبر وعاء ثانٍ 99.(+H) ويستبدلها بأيونات الهيدروجين ،(+Na) والصوديوم ،(+Mg2) المغنيسيوم ،(+Ca2) والذي يمتص جميع الأيونات السالبة (الأنيونات) مثل الكلوريد ،(Anion Exchange Resin) "يحتوي على "راتنج التبادل الأنيوني (

Cl−)، الكبريتات (SO42−)، والبيكربونات (HCO3−)، ويستبدلها بأيونات الهيدروكسيد (99.(−OH في النهاية، تتحد أيونات الهيدروجين (

H+) مع أيونات الهيدروكسيد (OH−) لتكوين جزيئات ماء نقية (99.(H2O

5.3. وحدة معالجة مياه الصرف الصناعي (Wastewater Treatment)

تنتج المصفاة كميات كبيرة من مياه الصرف الملوثة بمجموعة واسعة من المواد، بما في ذلك الزيوت، الفينولات، الأمونيا، الكبريتيدات، والمواد الصلبة العالقة.[101]

:الوظيفة وسبب الاستخدام
لا يمكن تصريف هذه المياه الملوثة مباشرة إلى البيئة (مثل الأنهار أو البحار) لما تسببه من أضرار جسيمة للنظم البيئية. وظيفة هذه الوحدة هي معالجة مياه الصرف لإزالة الملوثات إلى مستويات آمنة تتوافق مع اللوائح والمعايير البيئية الصارمة قبل تصريفها.103

المراحل الرئيسية للمعالجة:

1. **المعالجة الأولية (Primary Treatment):** تهدف إلى إزالة الملوثات الفيزيائية. تشمل هذه المرحلة فواصل الزيت والماء (مثل فواصل API) التي تسمح للزيت الأخف من الماء بالطفو على السطح ليتم كشطه، وأحواض ترسيب لإزالة المواد الصلبة العالقة.[103]
2. **المعالجة الثانوية (Secondary Treatment):** تهدف إلى إزالة الملوثات العضوية الذائبة. غالبًا ما تكون هذه المعالجة بيولوجية، حيث يتم استخدام الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا) في أحواض تهوية (مثل نظام الحمأة المنشطة) لاستهلاك المواد العضوية وتحويلها إلى كتلة حيوية يمكن ترسيبها وإزالتها.[101]
3. **المعالجة الثالثية (Tertiary Treatment):** هي مرحلة متقدمة قد تشمل الترشيح عبر مرشحات رملية أو أغشية، والامتزاز بالكربون المنشط، والتطهير (مثل استخدام الكلور أو الأشعة فوق البنفسجية) لإزالة ما تبقى من الملوثات الدقيقة وضمان أن المياه المعالجة آمنة تمامًا للتصريف.[102]

5.4. وحدات الهواء والنيتروجين (Air & Nitrogen Units)

توفر هذه الوحدات الغازات غير الهيدروكربونية الضرورية لتشغيل المصفاة والتحكم فيها بأمان.

:الوظيفة وسبب الاستخدام
يتم إنتاج نوعين رئيسيين من الهواء المضغوط، بالإضافة إلى النيتروجين، ولكل منها استخدامات محددة وجودة مختلفة. الخلط بين أنواع الهواء يمكن أن يؤدي إلى مشاكل تشغيلية خطيرة.

- **هواء المصنع (Plant Air) مقابل هواء الأجهزة الدقيقة (Instrument Air):**
  - **هواء المصنع:** يُستخدم للأغراض العامة التي لا تتطلب نقاءً عاليًا، مثل تشغيل الأدوات التي تعمل بالهواء المضغوط (المثاقب، مفاتيح الربط)، وعمليات التنظيف، وغيرها. قد يحتوي على بعض الرطوبة وزيوت من الضاغط.[106]
  - **هواء الأجهزة الدقيقة:** هذا هو الهواء المستخدم لتشغيل أنظمة التحكم الآلي الحساسة في المصفاة، مثل صمامات التحكم الهوائية (Pneumatic Control Valves) والمشغلات (Actuators). يجب أن يكون هذا الهواء نظيفًا وجافًا تمامًا وخاليًا من أي زيت. وجود الرطوبة يمكن أن يؤدي إلى تجمد خطوط الهواء في الطقس البارد أو تآكل المكونات الدقيقة، بينما يمكن لجسيمات الزيت أو الغبار أن تسد الفتحات الصغيرة في الأجهزة، مما يؤدي إلى فشل أنظمة التحكم، وهو ما قد يتسبب في حوادث خطيرة.[106] لذلك، يتم إنتاج هواء الأجهزة الدقيقة عبر نظام ضغط وتجفيف وترشيح مخصص وشديد الصرامة.

جدول 2: مقارنة بين هواء المصنع وهواء الأجهزة الدقيقة

الخاصية	هواء المصنع (Plant Air)	هواء الأجهزة الدقيقة (Instrument Air)
محتوى الرطوبة (نقطة الندى)	مرتفع نسبيًا	منخفض جدًا (عادةً −40°C عند الضغط الجوي)

محتوى الزيت	قد يحتوي على رذاذ زيت	خالٍ من الزيت عمليًا
محتوى الجسيمات الصلبة	ترشيح أساسي	ترشيح دقيق (أقل من 1 ميكرون)
الاستخدامات الرئيسية	تشغيل الأدوات الهوائية، التنظيف العام	تشغيل صمامات التحكم، أجهزة القياس، أنظمة التحكم الآلي

(المصادر: [106])

- وحدة إنتاج النيتروجين (Nitrogen Unit):
النيتروجين هو غاز خامل، أي أنه لا يتفاعل بسهولة مع المواد الأخرى ولا يساعد على الاشتعال.110 هذه الخاصية تجعله لا غنى عنه لأغراض السلامة في المصفاة. تشمل استخداماته الرئيسية:
  - **التطهير (Purging):** قبل بدء تشغيل أي وعاء أو خط أنابيب أو إعادته للخدمة بعد الصيانة، يتم ضخ النيتروجين فيه لإزاحة الهواء (وبالتالي الأكسجين). هذا يمنع تكوين خليط قابل للاشتعال أو الانفجار عند إدخال الهيدروكربونات.[111]
  - **التغطية (Blanketing):** يتم الحفاظ على طبقة من النيتروجين فوق سطح السوائل القابلة للاشتعال في خزانات التخزين لمنع دخول الهواء ومنع تبخر المنتج.[112]
  - **استخدامات أخرى:** يستخدم في اختبارات الضغط، وتنظيف خطوط الأنابيب، وكغاز حامل في بعض أجهزة التحليل.[113]

إن وحدات المرافق، على الرغم من أنها تعمل في الخلفية، إلا أنها تشكل حجر الأساس لموثوقية وسلامة المصفاة. انقطاع إمداد هواء الأجهزة الدقيقة يمكن أن يؤدي إلى فقدان السيطرة على العمليات. فشل نظام مياه التبريد يمكن أن يسبب ارتفاعًا خطيرًا في درجات حرارة المفاعلات. ونقص المياه منزوعة المعادن يمكن أن يوقف إنتاج البخار، مما يشل حركة المصفاة بأكملها. لذلك، فإن موثوقية هذه الوحدات "المساندة" لا تقل أهمية عن موثوقية وحدات المعالجة الرئيسية.

خاتمة: التكامل الصناعي في معامل التكرير

كما يتضح من هذا التقرير، فإن مصفاة تكرير البترول ليست مجرد تجميع لوحدات مستقلة، بل هي نظام عضوي معقد وشديد الترابط. إن نجاح المصفاة وكفاءتها يعتمدان بشكل كلي على هذا التكامل الدقيق بين جميع مكوناتها. لقد رأينا كيف أن المتبقي من وحدة التقطير الجوي يصبح اللقيم الثمين لوحدة التقطير التفريغي، وكيف أن الهيدروجين المنتج في وحدة إعادة التشكيل الحفزي هو شريان الحياة لوحدات المعالجة الهيدروجينية التي تضمن إنتاج وقود نظيف.

إن تدفق المواد والطاقة بين الوحدات - من النافثا إلى وحدات تحسين البنزين، ومن زيت الغاز التفريغي إلى وحدات التكسير، ومن الغازات الحامضية إلى وحدات المعالجة البيئية، ومن المنتجات الثانوية الغازية إلى نظام غاز الوقود - هو ما يحول عملية التكرير من مجرد فصل فيزيائي إلى عملية تحويل كيميائي واقتصادي وبيئي متكاملة. هذا التكامل هو مفتاح تحقيق أقصى استفادة من كل قطرة نفط خام، مع الالتزام بالمتطلبات المتزايدة للسوق والمواصفات البيئية الصارمة التي تشكل عالم الطاقة اليوم.

Works cited

1. تكرير النفط | OER Commons, accessed September 3, 2025,

https://oercommons.org/courseware/lesson/94488/student/?section=8
2. ويكيبيديا - تكرير النفط, accessed September 3, 2025, https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%AA%D9%83%D8%B1%D9%8A%D8%B1_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7
3. تكرير البترول: العمليات والمراحل من الخام إلى المنتجات النهائية - لندن بريمير سنتر, accessed September 3, 2025, https://ar.lpcentre.com/articles/petroleum-refining-processes-and-stages-from-crude-to-final-products
4. مراحل تكرير البترول .. 5 عمليات رئيسية من الخام إلى المنتجات النهائية - بترونيوز, accessed September 3, 2025, https://petro-news.com/114434/
5. An Overview of Refinery Products and Processes | FSC 432: Petroleum Refining, accessed September 3, 2025, https://courses.ems.psu.edu/fsc432/content/overview-refinery-products-and-processes
6. Flow diagram of typical refinery - Expect Asia, accessed September 3, 2025, https://www.ex-pect.com/process-plants/flow-diagram-of-typical-refinery/
7. Process flow diagram - Typical oil refinery | Cross-Functional Flowchart - The easiest way to draw crossfunctional | Chemical and Process Engineering - Conceptdraw.com, accessed September 3, 2025, https://www.conceptdraw.com/examples/basic-refinery-drawing
8. مراحل تكرير النفط - موضوع, accessed September 3, 2025, https://mawdoo3.com/%D9%85%D8%B1%D8%A7%D8%AD%D9%84_%D8%AA%D9%83%D8%B1%D9%8A%D8%B1_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7
9. خطوات تكرير النفط - موضوع, accessed September 3, 2025, https://mawdoo3.com/%D8%AE%D8%B7%D9%88%D8%A7%D8%AA_%D8%AA%D9%83%D8%B1%D9%8A%D8%B1_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7
10. مراحل إنتاج النفط ... من التنقيب والبحث حتى التداول - بترونيوز, accessed September 3, 2025, https://petro-news.com/89152/
11. Fluid catalytic cracking is an important step in producing gasoline - U.S. Energy Information Administration (EIA), accessed September 3, 2025, https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9150
12. أساليب وتقنيات تكرير النفط - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=XHRWJbPZAtM
13. Refinery Processes - API, accessed September 3, 2025, https://www.api.org/oil-and-natural-gas/wells-to-consumer/fuels-and-refining/refineries/how-refinery-works/refinery-processes
14. نزع الأملاح من النفط الخام - GEA, accessed September 3, 2025, https://www.gea.com/ar/oil-gas-energy/downstream/crude-oil-desalting/
15. (PDF) Crude Oil Desalting Process - ResearchGate, accessed September 3, 2025, https://www.researchgate.net/publication/285236397_Crude_Oil_Desalting_Process
16. Crude oil desalting process | Sulzer, accessed September 3, 2025, https://www.sulzer.com/en/shared/applications/refining-crude-oil-desalting-process
17. إزالة الاملاح من النفط الخام - ويكيبيديا, accessed September 3, 2025,

https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%A5%D8%B2%D8%A7%D9%84%D8%A9_%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%85%D9%84%D8%A7%D8%AD_%D9%85%D9%86_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7_%D8%A7%D9%84%D8%AE%D8%A7%D9%85
18. معالجة النفط الرطب وإزالة الاملاح - OilGasWiki, accessed September 3, 2025, https://www.oilgaswiki.com/2020/07/Crude-oil-deyhdration-and-desalting.html
19. Process flow diagram of a typical desalting unit. - ResearchGate, accessed September 3, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Process-flow-diagram-of-a-typical-desalting-unit_fig1_260287983
20. وحدة تقطير النفط الخام (CDU)، وحدة التقطير الجوي (ADU) - وحدات PCC, accessed September 3, 2025, https://ar.peiyangchem.com/modular-refinery/processing-units-of-oil-refinery/cdu.html
21. وحدات معالجة مصفاة البترول, accessed September 3, 2025, https://ar.peiyangchem.com/modular-refinery/processing-units-of-oil-refinery/
22. مقالة علمية للاستاذ المساعد الدكتور مالك مصطفى محمد بعنوان تكرير النفط, accessed September 3, 2025, https://uomus.edu.iq/NewDep.aspx?depid=6&newid=1530
23. ما هي عملية التقطير؟ تعرف على طريقة فصل مشتقات النفط خطوة بخطوة - اخباري 24, accessed September 3, 2025, https://ekhbary24.com/2025/02/28/%D9%85%D8%A7-%D9%87%D9%8A-%D8%B9%D9%85%D9%84%D9%8A%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1%D8%9F-%D8%AA%D8%B9%D8%B1%D9%81-%D8%B9%D9%84%D9%89-%D8%B7%D8%B1%D9%8A%D9%82%D8%A9-%D9%81%D8%B5%D9%84/
24. عملية تكرير البترول - ILO Encyclopaedia, accessed September 3, 2025, https://www.iloencyclopaedia.org/ar/part-xii-57503/oil-and-natural-gas/item/384-petroleum-refining-process
25. سلسلة كيمياء تصنيع البترول المحاضرة الاولي التقطير الجوي - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=RMB_CGfe7aU
26. أبراج التقطير | PDF - Scribd, accessed September 3, 2025, https://www.scribd.com/document/859367486/%D8%A3%D8%A8%D8%B1%D8%A7%D8%AC-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1
27. برج التقطير - PetroForce, accessed September 3, 2025, https://petroforce.co/ar/pages/63
28. مبدأ عمل أبراج التقطير(عربي)_ عمليات موحدة, الحلقة 4 - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=ykuXlMQP6WY
29. وثائقي أبراج التقطير الجزء الأول | فيلم مدبلج للعربية honeywell - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=9u8TRcl4tZI
30. المشتقات النفطية | مجلة القافلة, accessed September 3, 2025, https://archive.qafilah.com/ar/%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B4%D8%AA%D9%82%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7%D9%8A%D8%A9/
31. ما مشتقات النفط - موضوع, accessed September 3, 2025, https://mawdoo3.com/%D9%85%D8%A7_%D9%85%D8%B4%D8%AA%D9%82%

D8%A7%D8%AA_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7
32. An Oil Refinery Walk-Through - Emerson, accessed September 3, 2025, https://www.emerson.com/documents/automation/article-an-oil-refinery-walk-through-en-38066.pdf
33. معدات إنتاج التقطير الجوي والفراغ - المعرفة - شركة Shandong Avant New Material Technology Co., accessed September 3, 2025, https://ar.avant-al.net/info/the-production-equipment-of-72823047.html
34. تقطير تفريغي - ويكيبيديا, accessed September 3, 2025, https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1_%D8%AA%D9%81%D8%B1%D9%8A%D8%BA%D9%8A
35. ar.wikipedia.org, accessed September 3, 2025, https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%AA%D9%83%D8%B1%D9%8A%D8%B1_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7#:~:text=%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1%20%D8%AA%D8%AD%D8%AA%20%D8%A7%D9%84%D8%B6%D8%BA%D8%B7%20%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AE%D9%84%D8%AE%D9%84%20%C2%AB%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%81%D8%B1%D9%8A%D8%BA%D9%8A,%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%8A%20%D9%8A%D8%AA%D9%85%20%D8%A7%D9%84%D8%AD%D8%B5%D9%88%D9%84%20%D8%B9%D9%84%D9%8A%D9%87%D8%A7%20%D9%81%D9%8A
36. برج التقطير - FasterCapital, accessed September 3, 2025, https://fastercapital.com/kalimat/%D8%A8%D8%B1%D8%AC-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1.html
37. معدات برج عملية التقطير الفراغي لمصفاة النفط التكنولوجيا الجيدة, accessed September 3, 2025, https://sa.made-in-china.com/co_energyrecycling/product_Good-Technology-Petroleum-Refinery-Vacuum-Distillation-Process-Tower-Equipments_ysggsensrg.html
38. التقطير الفراغي دفعة VDB, accessed September 3, 2025, http://bpsps.ir/ar/%D9%85%D9%86%D8%AA%D8%AC%D8%A7%D8%AA-%D9%82%D9%88%D8%A9/%D9%85%D8%B9%D9%85%D9%84-%D8%AA%D9%83%D8%B1%D9%8A%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%B2%DB%8C%D9%88%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B3%D8%AA%D8%B9%D9%85%D9%84%D8%A9/%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D9%81%D8%B1%D8%A7%D8%BA%D9%8A-%D8%AF%D9%81%D8%B9%D8%A9
39. مكونات ونواتج عملية تقطير النفط الخام | E-Mufeed, accessed September 3, 2025, https://emufeed.com/index.php/ar/article/%D9%85%D9%83%D9%88%D9%86%D8%A7%D8%AA_%D9%88%D9%86%D9%88%D8%A7%D8%AA%D8%AC_%D8%B9%D9%85%D9%84%D9%8A%D8%A9_%D8%AA%D9%82%D8%B7%D9%8A%D8%B1_%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7_%D8%A7%D9%84%D8%AE%D8%A7%D9%85
40. وحدة المعالجة بالنفثا الهيدرولوجية (NHT) في المصفاة ، معالجة الغاز بالهيدروجين, accessed September 3, 2025, https://ar.peiyangchem.com/modular-refinery/processing-units-of-oil-refinery/nht.html
41. وحدة معالجة البنزين Naphtha hydrotreating - YouTube, accessed September 3, 2025,

https://www.youtube.com/watch?v=Phlj-GAql74
42. ماذا تعرف عن عملية استخلاص الكبريت من النفط ؟ - بترونيوز, accessed September 3, 2025, https://petro-news.com/44749/
43. نزع الكبريت المهدرج - ويكيبيديا, accessed September 3, 2025, https://ar.wikipedia.org/wiki/%D9%86%D8%B2%D8%B9_%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%A8%D8%B1%D9%8A%D8%AA_%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%87%D8%AF%D8%B1%D8%AC
44. أرشيف إزالة الكبريت - candcs, accessed September 3, 2025, https://www.candcs.de/ar/%D8%AA%D8%B7%D8%A8%D9%8A%D9%82-%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%86%D8%AA%D8%AC/%D8%A5%D8%B2%D8%A7%D9%84%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%A8%D8%B1%D9%8A%D8%AA/
45. انبعاثات صناعة تكرير النفط ومصادرها وطرق معالجتها - OAPEC, accessed September 3, 2025, https://oapecorg.org/media/86d35931-7c67-4e60-9c43-b76395e79f3d/514669472/OIL/164%20Oil@Gaz.pdf
46. ISOMERIZATION PROCESS FACT SHEET - EPA OSC Response, accessed September 3, 2025, https://response.epa.gov/site/download.ashx?counter=16907
47. ما هي عملية CCR في مصفاة؟, accessed September 3, 2025, http://ar.catacheme.com/news/what-is-the-ccr-process-in-a-refinery/
48. إصلاح حفزي - ويكيبيديا, accessed September 3, 2025, https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%A5%D8%B5%D9%84%D8%A7%D8%AD_%D8%AD%D9%81%D8%B2%D9%8A
49. Catalytic Reforming Unit (CCR) optimization - ABB, accessed September 3, 2025, https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=WP%2FCCRUNIT-EN&DocumentPartId=
50. تكامل المصافي الحيوية ومصافي تكرير النفط إلنتاج الوقود المتجدد - OAPEC, accessed September 3, 2025, https://oapecorg.org/media/cdd923f3-fd38-414b-b8fb-6c4b7c68075f/-372366880/Oil%20@%20Arab%202023/181-185/Oil%20Arb%20185.pdf
51. fastercapital.com, accessed September 3, 2025, https://fastercapital.com/arabpreneur/%D8%A7%D9%84%D8%A3%D9%8A%D8%B2%D9%88%D9%85%D8%B1%D8%A7%D8%AA--%D8%A7%D9%84%D8%B9%D9%84%D9%85-%D9%88%D8%B1%D8%A7%D8%A1-%D8%AA%D8%B9%D8%B2%D9%8A%D8%B2-%D8%AC%D9%88%D8%AF%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%88%D9%82%D9%88%D8%AF-%D9%81%D9%8A-%D9%85%D8%B5%D8%A7%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7.html#:~:text=%D9%85%D9%82%D8%AF%D9%85%D8%A9%20%D9%81%D9%8A%20isomerization,-%D8%AA%D8%B9%D8%AA%D8%A8%D8%B1%20%D8%A7%D9%84%D8%A3%D9%8A%D8%B2%D9%88%D9%85%D8%B1%D8%A7%D8%AA%20%D8%B9%D9%85%D9%84%D9%8A%D8%A9&text=%D9%8A%D8%AA%D9%85%20%D8%AA%D8%AD%D9%82%D9%8A%D9%82%20%D8%B0%D9%84%D9%83%20%D8%B9%D9%86%20%D8%B7%D8%B1%D9%8A%D9%82,%D8%A5%D9%84%D9%89%20%D8%A7%D9%84%D9%87%D9%8A%D8%AF%D8%B1%D9%88%D9%83%D8%B1%D8%A8%D9%88%D9%86%D8%A7%D8%AA%20%D8%B9%D8%A7%D9%84%D9%8A%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D8%A3%D9%88%D9%83%D8%AA%D8%A7%D9%86%20%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AA%D9%81%D8%B1%D8%B9

%D8%A9.
52. عملية وحدة isomerization في مصفاة ، مصنع ايزوميراتي الحفاز, accessed September 3, 2025, https://ar.peiyangchem.com/modular-refinery/processing-units-of-oil-refinery/isomerization-unit.html
53. What's That – Isomerization - Mansfield Service Partners (MSP), accessed September 3, 2025, https://msp.energy/whats-that-isomerization/
54. What is Isomerization? - EKT Interactive, accessed September 3, 2025, https://ektinteractive.com/what-is-isomerization/
55. الأيزومرات: العلم وراء تعزيز جودة الوقود في مصافي النفط - FasterCapital, accessed September 3, 2025, https://fastercapital.com/arabpreneur/%D8%A7%D9%84%D8%A3%D9%8A%D8%B2%D9%88%D9%85%D8%B1%D8%A7%D8%AA--%D8%A7%D9%84%D8%B9%D9%84%D9%85-%D9%88%D8%B1%D8%A7%D8%A1-%D8%AA%D8%B9%D8%B2%D9%8A%D8%B2-%D8%AC%D9%88%D8%AF%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%88%D9%82%D9%88%D8%AF-%D9%81%D9%8A-%D9%85%D8%B5%D8%A7%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7.html
56. Isomerization Unit - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=SjjwYoQAJIM
57. كيروسين | PDF - Scribd, accessed September 3, 2025, https://www.scribd.com/document/645861149/%D9%83%D9%8A%D8%B1%D9%88%D8%B3%D9%8A%D9%86
58. الكيروسين من مشتقات البترول .. إنتاج عالمي يتجاوز 6 ملايين برميل يوميًا - بترونيوز, accessed September 3, 2025, https://petro-news.com/118032/
59. LOW-SULFUR GASOLINE & DIESEL: THE KEY TO LOWER VEHICLE EMISSIONS - International Council on Clean Transportation, accessed September 3, 2025, https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Low-Sulfur_ICCT_2003.pdf
60. للمنتجات التي تم تكسيرها حراريا المعالجة بالهيدرو, accessed September 3, 2025, https://www.gccpo.org/ElectronicPublication/Specifications/26835.pdf
61. Kerosene Sweetening / Hydrotreating - Axens, accessed September 3, 2025, https://www.axens.net/expertise/oil-refining/kerosene-sweetening-hydrotreating
62. وحدة المعالجة الهيدروجينية بالديزل - وحدات PCC - Peiyang Chemical Equipment Co., Ltd., accessed September 3, 2025, https://ar.peiyangchem.com/modular-refinery/processing-units-of-oil-refinery/dht.html
63. What Is Ultra-Low Sulfur Diesel? | Pros & Cons of ULSD - Hot Shot's Secret, accessed September 3, 2025, https://www.hotshotsecret.com/what-is-ultra-low-sulfur-diesel/
64. كل ما تحتاج إلى معرفته عن وقود الديزل - Pedal Commander, accessed September 3, 2025, https://pedalcommander.ae/blogs/garage/everything-you-need-to-know-about-diesel-fuel
65. بديل بالموجات فوق الصوتية لإزالة الكبريت الهيدروجيني - Hielscher الفوق صوتيات, accessed September 3, 2025, https://www.hielscher.com/ar/oil_desulfurization_02.htm
66. Benefits of ULSD | AK Dept. of Environmental Conservation, accessed September 3, 2025, https://dec.alaska.gov/air/anpms/ultra-low-sulfur-diesel/benefits/
67. HGU, DHT Units Overview | PDF | Cracking (Chemistry) | Chemical Reactions -

Scribd, accessed September 3, 2025, https://www.scribd.com/presentation/444262561/HGU-DHT-Units-overview-pptx
68. محفز التحلية أو الكبريت merox - PFchemistry, accessed September 3, 2025, https://pfchemistry.com/products/%D9%85%D8%AD%D9%81%D8%B2-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D8%AD%D9%84%D9%8A%D8%A9-%D8%A3%D9%88-%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%A8%D8%B1%D9%8A%D8%AA-merox/
69. Merox - Wikipedia, accessed September 3, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Merox
70. Question 15: In treating kerosene, what factors play into the decision to use hydrotreating versus sweetening processes such as caustic treating?, accessed September 3, 2025, https://www.afpm.org/data-reports/technical-papers/qa-search/question-15-treating-kerosene-what-factors-play-decision
71. Desulphurization of Jet Fuel using Merox Process: A Review - IJRASET, accessed September 3, 2025, https://www.ijraset.com/research-paper/desulphurization-of-jet-fuel-using-merox-process
72. Merox treatment in the oil & gas industry - Refining - KROHNE Group, accessed September 3, 2025, https://www.krohne.com/en-in/industries/oil-gas-industry/refining-oil-gas-industry/merox-treatment-in-the-oil-and-gas-industry
73. The Role of Solvent Deasphalting (SDA) In Refining, accessed September 3, 2025, https://refiningcommunity.com/wp-content/uploads/2020/12/The-Role-of-Solvent-De-Asphalting-SDA-in-Refining-2.pdf
74. Deasphalting | FSC 432: Petroleum Refining - EMS Online Courses, accessed September 3, 2025, https://courses.ems.psu.edu/fsc432/content/deasphalting
75. Solvent Deasphalting 101 - Refining Community, accessed September 3, 2025, https://refiningcommunity.com/solvent-deasphalting-101/
76. How does SDA (solvent deasphalting) separate asphaltenes? - Patsnap Eureka, accessed September 3, 2025, https://eureka.patsnap.com/article/how-does-sda-solvent-deasphalting-separate-asphaltenes
77. عملية التكرير - نزع الأسفلت بالمذيبات - المعرفة - شركة Shandong Avant New Material Technology Co. ، Ltd, accessed September 3, 2025, https://ar.avant-al.net/info/refining-process-solvent-deasphalting-72823049.html
78. Deasphalting Process | FSC 432: Petroleum Refining, accessed September 3, 2025, https://courses.ems.psu.edu/fsc432/content/deasphalting-process
79. Solvent Importance | PDF | Oil Refinery | Asphalt - Scribd, accessed September 3, 2025, https://www.scribd.com/document/409448471/Solvent-Importance
80. ROSE® - KBR, accessed September 3, 2025, https://www.kbr.com/sites/default/files/documents/2023-09/refining_rose_2019jul.pdf
81. Solvent Deasphalting (SDA) - Axens, accessed September 3, 2025, https://www.axens.net/expertise/oil-refining/solvent-deasphalting-sda
82. Amine Scrubbing System Overview - How Amine Treating Works - Carver Pump,

accessed September 3, 2025, https://www.carverpump.com/amine-scrubbing-system-overview/
83. Amine Treatment Processing Basics | Blog - Opero Energy, accessed September 3, 2025, https://operoenergy.com/amine-treatment-processing-basics/
84. How Amine Treating Sweetens Natural Gas - Kinder Morgan, accessed September 3, 2025, https://www.kindermorgan.com/Operations/KM-Treating/News/How-Amine-Treating-Sweetens-Natural-Gas
85. Amine treatment - GEA, accessed September 3, 2025, https://www.gea.com/ar/oil-gas-energy/downstream/amine-treatment/
86. Amine Treating Equipment for Natural Gas Sweetening, accessed September 3, 2025, https://transtextreating.com/solutions/gas-treating/amine-plants/
87. تكرير البترول الخاصة بـ إرشادات بشأن البيئة والصحة والـ, accessed September 3, 2025, https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/0000199659arar049-petroleum-refining.pdf
88. The Claus Process | netl.doe.gov, accessed September 3, 2025, https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/claus-process
89. Fuel Gas Systems in Oilfield Facility - AONG website, accessed September 3, 2025, https://www.arab-oil-naturalgas.com/fuel-gas-systems-in-oilfield-facility/
90. FUEL SYSTEM: COMPONENTS, WORKING PRINCIPLES, SYMPTOMS AND EMISSION CONTROLS - Pro-M Racing, accessed September 3, 2025, https://www.promracing.com/blog/fuel-system-components-working-principles-symptoms-and-emission-controls
91. Fuel Gas Systems - Illinois Fire Service Institute, accessed September 3, 2025, https://www.fsi.illinois.edu/content/courses/programs/investigation/files/pdfs/FIPP%20PPT%20Ch%2007%20Fuel%20Gas%20Systems.pdf
92. Fuel Gas Supply System for Gas Power Plants | Emerson, accessed September 3, 2025, https://www.emerson.com/documents/automation/fuel-gas-supply-system-for-gas-power-plants-white-paper-en-10975562.pdf
93. دورات التبريد الانضغاطية البسيطة, accessed September 3, 2025, https://staffsites.sohag-univ.edu.eg/uploads/1655/1542826461%20-%20Chapter%202%20Ref%20Cycles.pdf
94. Cooling Water Systems Fundamentals | Handbook - ChemTreat, accessed September 3, 2025, https://www.chemtreat.com/solutions/water-essentials-handbook-chapter-cooling-water-system-fundamentals/
95. دورة تكييف مركزى (HVAC) 6- شرح مفصل لـ ابرج التبريد Cooling towers - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=yRlFcU33kJw
96. المشتريات,ما هي معالجات المياه التي تتطلب أنظمة المياه UF انخفاض سعر أنظمة معالجة المياه بالترشيح الفائق منزوعة الأيونات؟, accessed September 3, 2025, https://ar.chunkerowaterplant.com/news/water-treatment-machine-deionized-water-system
97. معالجة مياه الغلايات - فلتري, accessed September 3, 2025,

https://filterie.com/%D9%85%D8%B9%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%A9-%D9%85%D9%8A%D8%A7%D9%87-%D8%A7%D9%84%D8%BA%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A7%D8%AA/
98. كيفية تحضير الماء منزوع الأيونات - نيو ووتر - NEWater, accessed September 3, 2025, https://www.newater.net/ar/%D9%83%D9%8A%D9%81%D9%8A%D8%A9-%D8%B5%D9%86%D8%B9-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%A7%D8%A1-%D9%85%D9%86%D8%B2%D9%88%D8%B9-%D8%A7%D9%84%D8%A3%D9%8A%D9%88%D9%86%D8%A7%D8%AA/
99. What Is Water Demineralization and How Does It Work? - SAMCO Technologies, accessed September 3, 2025, https://samcotech.com/what-is-demineralization-and-how-does-it-work/
100. How Does a Demineralization System Work? - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=1iYUIMOUsDY
101. معالجة مياه الصرف الصحي لمصافي النفط: اختيار وسائط MBBR وأنظمة التهوية وأنظمة RAS, accessed September 3, 2025, https://ar.aquasust.com/comm09/Oil-Refinery-Wastewater-Treatment.htm
102. معالجة مياه الصرف الصناعية - ويكيبيديا, accessed September 3, 2025, https://ar.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D8%B9%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%A9_%D9%85%D9%8A%D8%A7%D9%87_%D8%A7%D9%84%D8%B5%D8%B1%D9%81_%D8%A7%D9%84%D8%B5%D9%86%D8%A7%D8%B9%D9%8A%D8%A9
103. شهور اساسيات معالجه مياه الصرف - شركة مياه الشرب والصرف الصحي بالبحيرة 6, accessed September 3, 2025, https://bwadc.com.eg/ws/ar/wp-content/uploads/2018/12/%D8%AF%D9%84%D9%8A%D9%84-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AA%D8%AF%D8%B1%D8%A8-%D8%A7%D8%B3%D8%A7%D8%B3%D9%8A%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B9%D8%A7%D9%84%D8%AC%D9%87-%D9%88%D9%85%D8%AD%D8%B7%D8%A7%D8%AA-%D9%88%D8%B4%D8%A8%D9%83%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D8%B5%D8%B1%D9%81-%D8%A7%D9%84%D8%B5%D8%AD%D9%8A-.pdf
104. الفصل الأول مقدمة لمحطات معالجة الصد, accessed September 3, 2025, https://www.eeaa.gov.eg/Uploads/Reports/Files/AR_WWTP-SM.PDF
105. معالجة المياة في مصفاة تكرير البترول Petroleum Refinery Water Treatment - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=KQiOyRp7-Mg
106. instrument air vs plant air | Automation & Control Engineering Forum, accessed September 3, 2025, https://control.com/forums/threads/instrument-air-vs-plant-air.9294/
107. Service Air Vs Instrument Air || Difference between Process Air & Instrument Air - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=5RELUNsTXrY
108. What is Instrument Air? - 12:eleven, accessed September 3, 2025, https://www.12eleven.com/news/what-is-instrument-air
109. Compressed air/Breathing air/Instrument air Basics@ChemicalMahi - YouTube, accessed September 3, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=yWJo4yBeK2M
110. النيتروجين: المقصود به وأماكن استخدامه - Atlas Copco Egypt, accessed September 3, 2025,

https://www.atlascopco.com/ar-eg/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-nitrogen-gas
111. مولدات النيتروجين لصناعة النفط والغاز - OXYMAT, accessed September 3, 2025, https://oxymat.com/ar/oil-and-gas/
112. تطبيقات مولدات النيتروجين في حقول النفط - Minnuo, accessed September 3, 2025, https://minnuogas.com/ar/%D8%AA%D8%B7%D8%A8%D9%8A%D9%82%D8%A7%D8%AA-%D9%85%D9%88%D9%84%D8%AF%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%8A%D8%AA%D8%B1%D9%88%D8%AC%D9%8A%D9%86-%D9%81%D9%8A-%D8%AD%D9%82%D9%88%D9%84-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7/
113. إحياء الآبار النفطية بالنيتروجين .. ضغط أقل بـ 30% وإنتاج متجدد - بترونيوز, accessed September 3, 2025, https://petro-news.com/52466/
114. اهمية و استخدامات غاز النيتروجين - Atlas Copco, accessed September 3, 2025, https://www.atlascopco.com/ar-eg/compressors/customerbenefit/industrial-gases/applications/nitrogenapplications