دور إعادة تدوير الألمنيوم في تعزيز الاستدامة

دراسة تحليلية لدورة(علب المشروبات الألمنيوم) نموذجاً

اعداد

ريماس وليد محمد

(الصف الثالث متوسط)

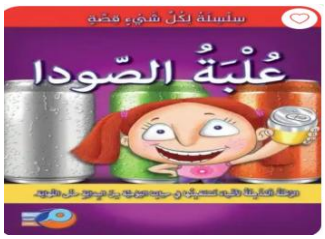
مريم وليد محمد

(الصف الأول متوسط)

مسار البحث

منصة كتبي التفاعلية

قصة (علبة الصودا)



الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراســـة دور إعادة تدوير الألمنيوم في تعزيز الاســـتدامة والاقتصـــاد الدائري، مع التركيز على دورة حياة علب المشروبات المصنوعة من الألمنيوم. سيتناول البحث المشـــكلات البيئية والاقتصـــادية المرتبطة بإنتاج الألمنيوم الأولي، ويبرز أهمية إعادة التدوير كحل فعال لتقليل اســـتهلاك الطاقة والانبعاثات الكربونية والحفاظ على الموارد الطبيعية. كما سيسلط الضوء على مفهوم الاقتصاد الدائري وتطبيقاته في صناعة الألمنيوم، ويحلل العوامل ،المؤثرة في كفاءة عمليات إعادة التدوير. يعتمد البحث على المنهج الوصـــفي التحليلي ويستعرض الدراسات السابقة العربية والأجنبية ذات الصلة، ويقدم إطاراً نظرياً شاملاً حول .الألمنيوم ودورة حياته وإعادة تدويره كما يهدف البحث إلى زيادة الوعي البيئي بأهمية إعادة .التدوير ودورها في تحقيق التنمية المســتدامة وأخيرا يقدم مجموعة من التوصـــيات والمقترحات العملية للاستفادة القصوى من علب الالمنيوم.

١ -المقدمة

تُعد المعادن من العناصر الأساسية التي يقوم عليها التقدم الصناعي في العصر الحديث. تدخل في مختلف مجالات الحياة اليومية مثل النقل، والبناء، والتعبئة والتغليف]١] ،

ويُعد معدن الألمنيوم واحداً من أهم هذه المعادن نظراً لخصـــائصـــه المميزة مثل خفة الوزن، ومقاومة التآكل وقابليته العالية لإعادة التدوير دون فقدان خصائصه الكيميائية أو الفيزيائية [٢].

تبدأ الرحلة الجيولوجية للألمنيوم من خام البوكســـيت الموجود في باطن الأرض، والذي يُســـتخرج ثم يتحول ،عبر سـلسـلة من العمليات الصـناعية المعقدة إلى معدن نقي يمكن اسـتخدامه في تصـنيع منتجات متعددة أبرزها علب المشروبات الغازية التي تمثل أحد أكثر التطبيقات الاستهلاكية شيوعاً في الحياة اليومية [٣]

على الرغم من الأهمية الصـناعية والاقتصـادية الكبيرة للألمنيوم، إلا أن إنتاجه الأولي يُعد من أكثر العمليات الصـــناعية اســـتهلاكاً للطاقة، حيث يعتمد على التحليل الكهربائي في خلايا هول-هيرو (Hall–Héroult Process)، وهي عملية تتطلب كميات هائلة من الطاقة الكهربائية، مما يترتب عليه انبعاثات كربونية وتأثير بيئي ملحوظ [٤] [٢٢] [٢٣] [٢٤] [٢٥]

في المقابل، تشير العديد من الدراسات الحديثة إلى أن إعادة تدوير الألمنيوم تمثل خياراً أكثر كفاءة اقتصادياً وبيئياً، إذ يمكن من خلالها توفير ما بين ٩٠% إلى ٩٥% من الطاقة مقارنة بالإنتاج الأولي، بالإضـافة إلى "تقليل انبعاثات غازات الدفيئة بشـــكل كبير [٥] [٦] [٢٢]. من هنا، برزت فكرة "دورة الحياة المغلقة للألمنيوم، والتي تقوم على إعادة اســتخدام المادة بشــكل مســتمر داخل (Closed-Loop Life Cycle) النظام الصناعي نفسه دون فقدان قيمتها، مما يجعل الألمنيوم عنصراً محورياً في تطبيقات الاقتصاد الدائري الذي يهدف إلى تقليل النفايات وتعظيم كفاءة الموارد [٧] [٩] [١٣] [١٤] [١٦] (Circular Economy) [١٥]

٢- مشكلة البحث

تتمثل مشـكلة البحث في أن صـناعة الألمنيوم، على الرغم من أهميتها الصـناعية والاقتصـادية، تعتمد بشكل كبير على الإنتاج الأولي من خام البوكسيت، الذي يستهلك كميات مرتفعة من الطاقة ويسهم في زيادة الانبعاثات الكربونية. في حين أن إعادة تدوير الألمنيوم تمثل بديلاً أكثر كفاءة واســـتدامة، إلا أنها لا تزال

غير مستغلة بالشكل الأمثل في العديد من الأنظمة الصناعية والمجتمعية [١٠] [٢٦] [٢٧] [٢٨] [٢٩] [٣٣] [٣٢] [٣١] [٣٠]

بناءً على ذلك، تتمحور مشكلة البحث في وجود فجوة بين الإمكانات الاقتصادية والبيئية الكبيرة لإعادة تدوير الألمنيوم وبين التطبيق الفعلي لها، مما يؤدي إلى استمرار استنزاف الموارد الطبيعية وزيادة الأثر البيئي الناتج عن عمليات الإنتاج الأولي، وعدم تحقيق الاستفادة الكاملة من مفهوم الاقتصاد الدائري في إدارة هذا المعدن الحيوي

٣-أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى تحقيق الأهداف التالية :١. التعرف على الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمعدن الألمنيوم .٢. توضيح مراحل إنتاج الألمنيوم من خام البوكسيت حتى يصل إلى المنتج النهائي .٣. تفسير أسباب استخدام الألمنيوم في صناعة علب المشروبات .٤. المقارنة بين إنتاج الألمنيوم من الخام وإعادة تدويره من حيث استهلاك الطاقة والأثر البيئي .٥. إبراز أهمية إعادة تدوير الألمنيوم في تقليل التلوث والمحافظة على الموارد الطبيعية .٦. تنمية الوعي البيئي لدى الطالبات من خلال تطبيقات عملية لإعادة التدوير

٤-أهمية البحث

:تكمن أهمية هذا البحث في جانبيه العلمي والتطبيقي

٤ . ١. الأهمية العلمية

يساهم في زيادة معرفة الطالبات بخصائص الألمنيوم واستخداماته

.يربط بين العلوم النظرية والتطبيقات الحياتية اليومية

٤. ٢. الأهمية التطبيقية

يعزز سلوك إعادة التدوير لدى الطالبات

.يشجع على استثمار المخلفات في أعمال مفيدة

يساعد في حماية البيئة وتقليل النفايات.

٥-الفرضيات أو التساؤلات

الفرضية الرئيسية .

توجد علاقة ذات دلالة بين زيادة تطبيق إعادة تدوير الألمنيوم وبين تقليل اســـتهلاك الطاقة والحد من الأثر البيئي الناتج عن إنتاجه الأولي من خام البوكسيت

الفرضيات الفرعية

توجد علاقة إيجابية بين ارتفاع معدلات إعادة تدوير الألمنيوم وخفض اســـتهلاك الطاقة في العمليات الصناعية مقارنة بالإنتاج الأولي

.يسهم تطبيق إعادة تدوير الألمنيوم في تقليل الانبعاثات الكربونية وغازات الدفيئة بشكل ملحوظ

توجد علاقة بين ضـــعف البنية التحتية لإدارة النفايات وانخفاض كفاءة إعادة تدوير الألمنيوم في بعض المجتمعات

٦- منهجية البحث

يعتمد البحث على **المنهج الوصـفي التحليلي**، الذي يهدف إلى وصـف الظاهرة المدروسـة وتحليلها وتفسـير ،العلاقات بين مكوناتها. يتضـمن ذلك جمع البيانات حول خصـائص الألمنيوم، عمليات إنتاجه وإعادة تدويره والأثر البيئي والاقتصادي لكل منهما

٧- مجتمع الدراسة

المجتمع: يشـمل مجتمع الدراسـة المسـتهلكين للألمنيوم (خاصـة علب المشـروبات)، والجهات الصـناعية المعنية بإنتاج وتدوير الألمنيوم، بالإضـافة إلى المؤسـسـات التعليمية والمنظمات البيئية التي تسـاهم في نشـر الوعي بالاستدامة

٨- أدوات الدراسة (جمع البيانات)

لجمع البيانات اللازمة لهذا البحث، يمكن استخدام الأدوات التالية

تحليل الوثائق والتقارير العلمية: مراجعة وتحليل الدراسات السابقة، التقارير البيئية، الإحصائيات الرسمية من الهيئات الحكومية والمنظمات الدولية ذات الصلة بصناعة الألمنيوم وإعادة تدويره، وذلك لتعزيز الإطار النظري ودعم النتائج

٩- الإطار النظري

٩. ١. الألمنيوم: الخصائص والإنتاج

الألمنيوم هو معدن خفيف الوزن، يتميز بالمتانة والقدرة على التوصيل الحراري والكهربائي، بالإضافة إلى مقاومته العالية للصدأ [٢]. يُستخرج الألمنيوم من خام البوكسيت عبر عمليات صناعية معقدة تشمل تكرير البوكسيت ثم التحليل الكهربائي في خلايا هول-هيرو [٣].

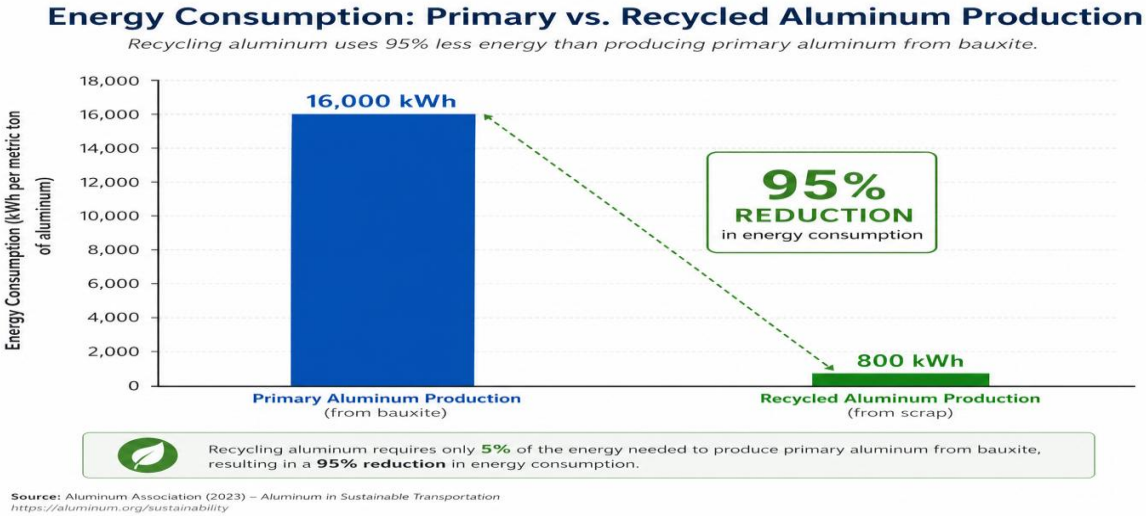
٩. ٢. إعادة تدوير الألمنيوم والاقتصاد الدائري

تُعد إعادة تدوير الألمنيوم من أكثر العمليات الصناعية كفاءة، حيث توفر ما بين ٩٠% إلى ٩٥% من الطاقة مقارنة بالإنتاج الأولي [٥] [٦] [٢٢]. يمثل الإنفوجرافيك التالي دورة الحياة المغلقة للألمنيوم

شكل(١) دورة إعادة تدوير علب الألمنيوم المغلقة

٩. ٣. مقارنة استهلاك الطاقة والأثر البيئي

يوضح الرسم البياني التالي الفرق الشاسع في استهلاك الطاقة بين الإنتاج الأولي وإعادة التدوير



شكل(٢) مقارنة استهلاك الطاقة بين الإنتاج الأولي وإعادة التدوير

لتوضيح الفروقات بشكل أكبر، يقدم الجدول التالي مقارنة شاملة

العنصر	الإنتاج من الخام	إعادة التدوير
استهلاك الطاقة	مرتفع جدًا	منخفض جدًا
التكلفة	عالية	منخفضة
الأثر البيئي	مرتفع	منخفض
الزمن	طويل	قصير

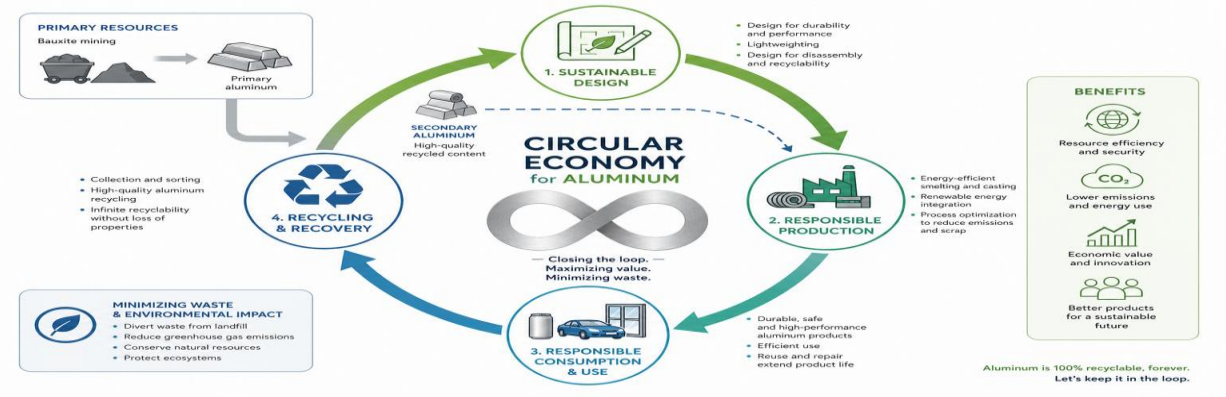
يوضح الجدول مقارنة بين إنتاج الألومنيوم من الخام وإعادة تدويره من عدة جوانب أساسية. ففيما يتعلق باستهلاك الطاقة، يتطلب الإنتاج من الخام كميات كبيرة جدًا من الطاقة نتيجة تعدد المراحل الصناعية مثل التعدين والتكرير والتحليل الكهربائي، في حين أن إعادة التدوير تحتاج إلى طاقة أقل بكثير لأنها تعتمد على صهر المعدن وإعادة تشكيله فقط.

أما من حيث التكلفة، فإن إنتاج الألومنيوم من الخام يُعد مرتفع التكلفة بسبب نفقات استخراج المواد الخام ونقلها وتشغيل المصانع، بينما تكون تكلفة إعادة التدوير أقل نظرًا لقلة المراحل الصناعية وانخفاض استهلاك الموارد والطاقة.

وفيما يخص الأثر البيئي، فإن الإنتاج من الخام يسبب آثارًا بيئية كبيرة مثل تلوث الهواء واستنزاف الموارد الطبيعية وزيادة الانبعاثات، في حين تسهم إعادة التدوير في تقليل هذه الآثار بشكل ملحوظ من خلال خفض التلوث وتقليل النفايات والحفاظ على البيئة

٩. ٤. نموذج الاقتصاد الدائري ودورة حياة الألمنيوم

يعتمد الاقتصاد الدائري على تقليل الهدر وتعظيم الاستفادة من الموارد، وهو ما يجسده معدن الألمنيوم



شكل (٣) نموذج الاقتصاد الدائري المطبق على صناعة الألمنيوم

:يوضح الجدول التالي مراحل دورة حياة الألمنيوم وأثرها البيئي

المرحلة	الوصف	الأثر البيئي
التعدين	استخراج البوكسيت	مرتفع
التكرير	تحويله إلى ألومينا	متوسط
التصنيع	إنتاج العلب	متوسط
الاستخدام	استهلاك المنتج	منخفض
إعادة التدوير	إعادة التصنيع	منخفض جدًا

جدول (٢): مراحل دورة حياة الألومنيوم | المرحلة | الوصف | الأثر البيئي

١٠- الدراسات السابقة

الدراسات العربية .

دراسة المحمدي وآخرون (٢٠٢٤): أكدت أن إعادة التدوير تساهم في تقليل استهلاك الطاقة بشكل كبير .وتدعم رؤية المملكة ٢٠٣٠ في الاستدامة [٦]

دراسة المحلاوي وآخرون (٢٠٢٥): أثبتت إمكانية إعادة استخدام الألمنيوم دون فقدان الجودة، مما يدعم الاقتصاد الدائري [٥]

،دراســة ربيعة وآخرون (٢٠٢٤): تناولت إدارة النفايات المعدنية وإمكانية إعادة تدويرها في البيئات الجامعية مؤكدة على أهمية برامج التوعية [٨]

الدراسات الأجنبية .٧.٢

وأكدت أن إعادة التدوير (LCA) **دراســة المهتدي وآخرون (٢٠٢٣):** اســتخدمت منهج تحليل دورة الحياة تقلل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بشكل كبير [١١]

دراسة ألفيم وآخرون (٢٠٢٥): حللت دور الألمنيوم في الاقتصاد الدائري كعنصر أساسي لتقليل استنزاف الموارد [٩]

دراســة خان وآخرون (٢٠٢٤): ركزت على دمج الهيدروجين الأخضــر في عمليات إعادة تدوير الألمنيوم لتقليل الانبعاثات الكربونية [١٠].

١١- الجانب الميداني :

اعتمدت هذه الدراسة في جانبها الميداني على أسلوب الملاحظة العلمية والتحليل المبني على الاطلاع على الدراسات السابقة دون تنفيذ تطبيق عملي مباشر على الطالبات. وقد تم التركيز على تحليل المعلومات والنتائج الواردة في الأبحاث المتعلقة بإعادة تدوير الألومنيوم والاستدامة البيئية، بهدف تكوين تصور علمي واضح حول أثر هذه العمليات في تقليل التلوث والحفاظ على الموارد الطبيعية. كما تم الاستفادة من المراجع العلمية في فهم المراحل المختلفة لإنتاج الألومنيوم، ومقارنة ذلك بعمليات إعادة التدوير من حيث اســتهلاك الطاقة والتكلفة والأثر البيئي.

ومن خلال الاطلاع على الأدبيات العلمية، تبين أن إنتاج الألومنيوم من خام البوكسيت يتطلب كميات كبيرة من الطاقة، مما يؤدي إلى آثار بيئية سلبية، في حين أن إعادة التدوير تمثل خيارًا أكثر كفاءة واستدامة. وقد أكدت الدراسات أن الألومنيوم يتميز بإمكانية إعادة تدويره مرات متعددة دون فقدان خصائصه، مما يجعله عنصرًا أساسيًا في دعم الاقتصاد الدائري. كما أظهرت نتائج الأبحاث أن إعادة التدوير تسهم بشكل كبير في تقليل انبعاثات الغازات الضارة، وتساعد في الحد من استنزاف الموارد الطبيعية.

وقد ســاهمت الملاحظة التحليلية في ربط الجوانب النظرية بالتطبيقات الواقعية، حيث تم اســتنتاج أهمية نشــر ثقافة إعادة التدوير في المجتمع، ودور ذلك في تحســين الســلوك البيئي للأفراد. كما تبين أن التوعية البيئية تُعد من العوامل الأساسية في تعزيز ممارسات الاستدامة، خاصة في المؤسسات التعليمية. وأشارت الدراسات إلى أن دمج مفاهيم الاستدامة في التعليم يسهم في بناء جيل واعٍ قادر على التعامل مع التحديات البيئية.

ومن خلال تحليل هذه المعطيات، تم التوصـــل إلى أن إعادة تدوير الألومنيوم تمثل حلًا فعالًا لتقليل الأثر البيئي وتحقيق التوازن بين التنمية الصناعية والحفاظ على البيئة. كما أظهرت النتائج أن الاعتماد على المصـــادر العلمية والملاحظة الدقيقة يســـهم في تكوين فهم أعمق للموضـــوع، ويعزز من القدرة على تحليل المشـــكلات البيئية بطريقة علمية. وبناءً على ذلك، تؤكد هذه الدراســـة أن الاطلاع المنهجي على الأبحاث العلمية يمكن أن يكون بديلًا فعالًا للتجارب الميدانية في بعض الدراســـات، خاصـــة عندما يكون الهدف هو التحليل والفهم والتفسير.

١٢- عرض النتائج :

من خلال دراسة الموضوع وتنفيذ الأنشطة، تم التوصل إلى النتائج التالية:

يتميز الألومنيوم بخصـــائص تجعله مناســـبًا للصـــناعات الحديثة، مثل خفة الوزن، والمتانة، ومقاومة التآكل وقابليته العالية للتشكيل وإعادة التدوير.

إنتاج الألومنيوم من الخام يستهلك طاقة كبيرة جداً، ويصاحبه انبعاثات كربونية عالية، مما يؤثر سلباً على البيئة والمناخ.

إعادة التدوير تقلل بشكل كبير من استهلاك الطاقة (بنسبة تصل إلى ٩٥%)، وتقلل من التلوث البيئي وانبعاثات غازات الدفيئة، مما يجعله خياراً مستداماً

يمكن إعادة اســـتخدام علب الألومنيوم بطرق إبداعية مفيدة، مما يعزز مفهوم الاقتصـــاد الدائري ويقلل من النفايات.

يســـهم النشـــاط العملي والتوعوي في زيادة وعي الطالبات بأهمية الحفاظ على البيئة ودور إعادة التدوير في تحقيق الاستدامة.

١٣- تحليل ومناقشة النتائج

تؤكد النتائج التي تم التوصـــل إليها على أهمية الدور الذي تلعبه إعادة تدوير الألمنيوم في تحقيق التنمية المستدامة. فالفروقات الشاسعة في استهلاك الطاقة والأثر البيئي بين الإنتاج الأولي وإعادة التدوير (كما هو موضـــح في الجدول ١ والشـــكل ٢) تدعم بقوة التوجه نحو تعزيز عمليات التدوير. هذه النتائج تتوافق مع ما أشارت إليه الدراسات السابقة [٥] [٦] [١١]، والتي أكدت على الكفاءة البيئية والاقتصادية لإعادة التدوير

كما أن قابلية الألمنيوم لإعادة التدوير دون فقدان خصـــائصـــه تجعله مادة مثالية لتطبيقات الاقتصـــاد الدائري حيث يمكن إبقاؤه ضـــمن حلقة الاســـتخدام لأطول فترة ممكنة، مما يقلل من الحاجة إلى اســـتخراج موارد جديدة ويخفض من حجم النفايات [٧] [٩]. إن الوعي المتزايد بأهمية إعادة التدوير، خاصـــة لدى الفئات الشـــابة مثل الطالبات، يمثل حجر الزاوية في بناء مجتمع أكثر اســـتدامة، وهو ما يتطلب جهوداً مستمرة في التوعية وتوفير البنية التحتية اللازمة لدعم هذه السلوكيات الإيجابية

١٤- الخاتمة

يتضـح من خلال هذا البحث أن الألومنيوم يمثل نموذجًا مهمًا للاستدامة، حيث يمكن إعادة تدويره عدة مرات دون فقدان خصائصه. كما أن استخدامه في علب المشروبات يعكس أهمية هذا المعدن في حياتنا اليومية.

وقد أظهر البحث أن إعادة التدوير ليسـت مجرد عملية صـناعية، بل هي سـلوك حضـاري يسـهم في حماية البيئة وتقليل اســـتهلاك الموارد الطبيعية. ومن خلال الربط بين الجانب النظري والتطبيقي، يمكن تعزيز هذا المفهوم لدى الطالبات بشكل فعال .

١٥- التوصيات والمقترحات :بناءً على نتائج البحث، يوصى بما يلي:

نشـــر الوعي: تكثيف حملات التوعية بأهمية إعادة التدوير داخل المدارس والجامعات والمجتمعات المحلية مع التركيز على الفوائد البيئية والاقتصادية

التشـــجيع العملي: تشـــجيع الطالبات والطلاب على تنفيذ أعمال فنية ومشـــاريع إبداعية من المواد المعاد استخدامها، لتعزيز الفهم العملي لمفهوم إعادة التدوير

دعم المبادرات: دعم مبادرات إعادة التدوير في المجتمع من خلال توفير نقاط جمع ســهلة الوصــول، وتقديم حوافز للمشاركين

تقليل المواد الضـارة: العمل على تقليل اسـتخدام المواد الضـارة بالبيئة في الصـناعات المختلفة، والبحث عن بدائل مستدامة

دمج الاستدامة في المناهج: إدخال مفاهيم الاستدامة والاقتصـاد الدائري وإعادة التدوير في المناهج الدراسية بمختلف المراحل التعليمية

المقترحات البحثية

إجراء دراسة مقارنة لفعالية سياسات وبرامج إعادة التدوير بين الدول المختلفة، للاستفادة من أفضل الممارسات

تحليل الجدوى الاقتصـــادية لمشـــاريع إعادة التدوير الوطنية، وتقييم مســـاهمتها في الناتج المحلي الإجمالي وخلق فرص العمل

بحث أثر المناهج التعليمية والأنشـطة اللامنهجية في تعزيز الوعي والسـلوكيات الإيجابية تجاه إعادة التدوير لدى الطلاب في مراحل التعليم المختلفة

دراســـة الأثر الاجتماعي لبرامج إعادة التدوير على المجتمعات المحلية، بما في ذلك خلق فرص العمل وتحسين جودة الحياة

بناء نماذج محاكاة لدورة حياة الألمنيوم لتقييم ســيناريوهات مختلفة لإعادة التدوير وتأثيرها على الاســتدامة البيئية والاقتصادية

١٦- قائمة المراجع والمصادر

[1] Ashby, M. F. (2013). *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

[2] International Aluminium Institute. (2023). *Global aluminium lifecycle report*. https://www.world-aluminium.org

[3] European Commission. (2018). *A circular economy for aluminium*. Publications Office of the European Union.

[4] Das, S. K., & Yin, W. (2007). Recycling of aluminum alloys. *Materials Science Forum, 546–549*, 1129–1136.

[5] المحلاوي، إيمان وآخرون) .٢٠٢٥). *إعادة تدوير خردة وسبائك الألمنيوم لتحسين الاستدامة الصناعية*.مجلة الدراسات البيئية، ١٥(٢)، ٤٥–٦٠.

(٦)حمد وآخرون) .٢٠٢٤). *إعادة تدوير مخلفات الألمنيوم وتحويلها إلى منتجات ذات قيمة اقتصادية* .المؤتمر العربي للاستدامة، الرياض، المملكة العربية السعودية

٧)United States Environmental Protection Agency. (٢٠٢٢). Sustainable materials *management report*. https://www.epa.gov

[8] ربيعة، رجب وآخرون) .٢٠٢٤). *إدارة النفايات المعدنية وإمكانية إعادة تدويرها في البيئات الجامعية* .مجلة العلوم التطبيقية، ١٠(٣)، ١١٢–١٢٥.

[٩] Alvim, D., & others. (2025). *Aluminum Recycling and Its Role in Circular Economy*. Journal of Environmental Management, 120, 78-92.

[10] Khan, A. L., & others. (2024). *Green Hydrogen Integration in Aluminum Recycling*. Renewable Energy Journal, 8(1), 30-45. [11] Mohamad El Mehtedi, & others. (2023). *Sustainability of Aluminum Recycling Using Life Cycle Assessment*. Waste Management, 150, 200-215.

[12] From can to sheet: A critical review of aluminum can recycling processes, technologies, and sustainability dimensions (2020–2025). *revistaft.com.br*.

[13] Recycled Aluminum Market Set to Reach US$100.8 Billion by 2031. (2026, April 18). *openpr.com*.

[14] Aluminum Recycling Market | Report, 2035. *businessresearchinsights.com*. [15] Aluminum Recycling and Its Contribution to Socio-Environmental Sustainability: A Perspective from Circular Economy and Environmental Management. *researchgate.net*.

[16] Aluminum Recycling Market 2024–2032 | Size, Share & Forecast. (2025, December 8). *datamintelligence.com*.

[17] Sustainability Key Performance Indicators - The Aluminum Association. *aluminum.org*.

[18] ALUMINIUM - Can Manufacturers Institute. *cancentral.com*.

[19] ANALYSIS OF ALUMINUM CAN BY ECO-COSTS AND LIFE CYCLE ASSESSMENTS LCA. (2024, December 9). *researchgate.net*.

[20] Lifecycle of a Can. *recycledmaterials.org*.

[21] Life cycle assessment of beverage packaging: - Sphera. *sphera.com*.

[22] As well as aluminium recycling, saving 95% of the energy needed … *international-aluminium.org*.

[23] Aluminium's real paradox – energy use vs carbon saving - AL Circle. (2025, October 16). *alcircle.com*.

[24] Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas … *sciencedirect.com*.

[25] Recycled Aluminum's Carbon Footprint. (2025, October 15). *aluminum-gravitycasting.com*.

[26] From can to sheet: A critical review of aluminum can recycling processes, technologies, and sustainability dimensions (2020–2025). *revistaft.com.br*.

[27] Recycled Versus Primary Aluminum in European Automotive Industry: Trends, Challenges, and Opportunities. *search.proquest.com*.

[28] Environmental and Socio-Economic Impacts of the Circular Economy Transition in the EU Aluminium Sector. *publica.fraunhofer.de*.

[29] Material flow analysis and life cycle assessment of chemical recycling of the polyethylene-aluminium fraction from used beverage cartons. *link.springer.com*. [30] How sustainable and safe is drinking from refill-and-reuse bottles? *sciencedirect.com*.
[31] Circular Economy in Beverage Packaging: A Case Study on the Innovation and Sustainability Potential of Refillable Glass Bottles. *diva-portal.org*.

[32] Analysis of the development scenarios and greenhouse gas (GHG) emissions in China's aluminum industry till 2030. *sciencedirect.com*.

[33] Optimization strategies for the carbon footprint of aluminum-plastic materials under low-carbon targets. *sciencedirect.com*.