مقارنة لبعض تقنيات الفرز لإعادة تدوير المواد البلاستيكية

Comparison of some Sorting Techniques for Plastics Recycling

م. ملاك غريب الموصلي
هندسة التصميم الميكانيكي
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

أ.د.م. نزيه أبو صالح
هندسة التصميم الميكانيكي
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

الملخص Abstract

يقدم هذا البحث المبادئ الأساسية لثلاثة نماذج مختلفة من أساليب فصل المواد البلاستيكية ودليل عام من أجل اختيار الطريقة الأكثر فعالية لفرز خليط المواد البلاستيكية. كما يقدم نتائج الاختبارات التي تم تنفيذها لفصل مواد PVC وABS وPET من الأنواع المختلفة للخليط البلاستيكي بهدف تحسين درجة نقاء المواد عند إعادة التدوير الميكانيكية أو إعادة التدوير بالتحويل للمواد الأولية.

الكلمات المفتاحية: المواد البلاستيكية، الفرز، الفصل، إعادة التدوير، الاسترجاع.

أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في التركيز على مرحلة الفرز كمرحلة هامة من مراحل إعادة تدوير المخلفات البلاستيكية للحصول على مواد نقية وبالتالي منتج معاد تدويره عالي الجودة.

هدف البحث

الحصول عن طريق تقنيات فرز المواد البلاستيكية على منتج نقي من خلال عرض ثلاث تقنيات للفرز تعمل على فصل مادتين بعضهما عن بعض، وتبيان فعالية هذه التقنيات من خلال عرض نتائج الاختبارات التي تم تنفيذها لفصل مواد PVC وABS وPET من خليط PVC/PP وABS/PS و PET/PE على الترتيب، بالإضافة إلى دليل عام لاختيار الأسلوب الأكثر فعالية عند فصل نوع محدد من خليط المواد البلاستيكية.

الرموز والمصطلحات Glossary

أكريلونتريل بوتادين ستيرين	ABS
معيار التركيز	C
شدة الحقل الكهربائي $[KV/m]$	E
تواتر اهتزاز السطح المسامي $[s^{-1}]$	f
الرطوبة النسبية %	H
ارتفاع سطوح الفصل $[mm]$	h_l
بولي إثيلين	PE
بولي إثيلين ترفثلات	PET
بولي بروبلين	PP
بولي ستيرين	PS
بولي فينيل كلوريد	PVC
زمن الاحتكاك $[s]$	t
درجة الحرارة $[°C]$	T
سرعة التيار الهوائي الصاعد $[m/s]$	u
سرعة الاحتكاك $[m/s]$	v
الانحدار الطرفي بالدرجات	α
الانحدار الجانبي بالدرجات	β
كثافة المكون a	ρ_a
كثافة المكون b	ρ_b

1. المقدمة Introduction

وفقاً لإحصائيات وزارة الدولة لشؤون البيئة بلغت النفايات البلاستيكية في سورية لعام 2009 حوالي 622000 طن حيث تمثل هذه النفايات نسبة 11.7% وزناً من مجمل النفايات الصلبة و47% حجماً [1]، وبما أن استعمال البلاستيك في الآلات والالكترونيات والتعبئة والتغليف ..الخ في انتشار واتساع، فإن النتيجة هي ارتفاع كمية النفايات البلاستيكية، وبما أنه ينتج عن رمي المخلفات البلاستيكية أو إحراقها آثار بيئية خطيرة، لذلك فإن إعادة التدوير الميكانيكية أو إعادة التدوير بالتحويل إلى المواد الأولية أصبح حلاً للمشكلة، ومن الطريقتين السالفتي الذكر فإن إعادة التدوير الميكانيكية فعالة لأنها تستهلك طاقة أقل وتأثيراتها البيئية ضئيلة جداً وأقل من تلك الناتجة عن إعادة التدوير بالتحويل إلى المواد الأولية [5]. ومع ذلك إن إعادة التدوير الميكانيكية تُعتبر خيار مرضٍ بشرط الحصول عن طريق تقنيات الفرز على منتج عالي الجودة (أي أعلى من 96%). ويصف هذا البحث ثلاث عمليات هي: الفصل بإدراج الهواء والفصل بواسطة التكهرب بالاحتكاك وأسلوب الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي وذلك لفرز المواد البلاستيكية. بالإضافة إلى دليل عام لاختيار الأسلوب الأكثر فعالية عند فصل نوع محدد من خليط المواد البلاستيكية. كما يوضح البحث نتائج الاختبارات التي تم تنفيذها لفصل مواد PVC وABS وPET من خليط PVC/PP و ABS/PS و PET/PE على الترتيب وفعالية هذه التقنيات.

2. المواد Materials

تستخدم أنواع متعددة من المواد البلاستيكية بشكل واسع اليوم، ويبين الجدول (1) قائمة بالأنواع الرئيسية للمواد البلاستيكية وزاوية اتصالها المباشر مع الماء وكثافتها.

الجدول (1) خصائص بعض المواد البلاستيكية الشائعة الاستخدام

نوع البوليمير	الاختصار	الكثافة (kg / m^3)	زاوية الاتصال مع الماء (°)	تسلسل التكهرب بالاحتكاك
Acrylonitrile–butadiene–styrene	ABS	1060	87.3	شحنة موجبة (+)
Polyethylene terephthalate	PET	1350	76.5	
Polystyrene	PS	1050	86.3	
Polyethylene	PE	910 ~ 960	96.8	
Polypropylene	PP	900	95.0	
Polyvinyl chloride	PVC	1400	86.4	شحنة سالبة (−)

كما يبين الجدول السابق أيضاً تسلسل تكهرب هذه المواد بالاحتكاك، حيث أن المواد البلاستيكية مرتبة تبعاً لاستقطابها بعد الشحن الاحتكاكي [2,4]. على سبيل المثال عندما يحتك ABS وPS مع سطح PET فإن ABS يشحن بشحنة موجبة بينما يشحن PS بشحنة سالبة.

3. أساليب فصل خليط المواد البلاستيكية

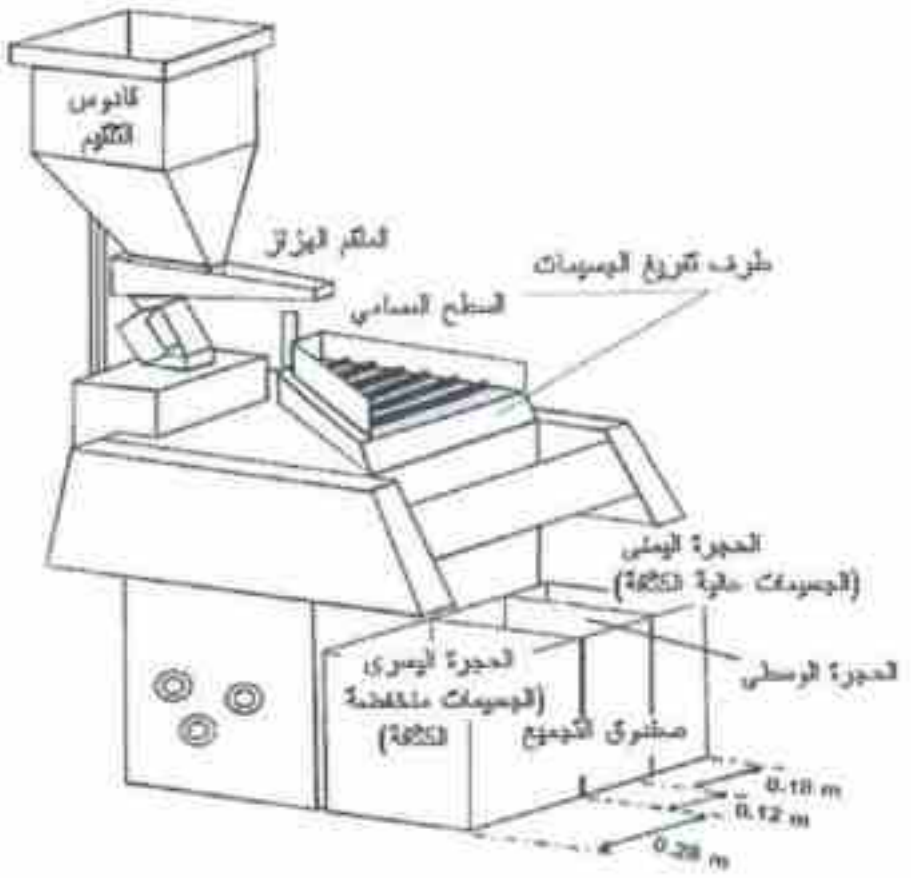
Methods for Separation of Plastic Mixtures

الموضوع المهم في المجتمع الآن هو إعادة تدوير الكميات الكبيرة من النفايات البلاستيكية. يتضمن الخليط الأولي عادةً أنواع مختلفة من المخلفات البلاستيكية، الأمر الذي يجعل مرحلة الفصل عمليةً مهمة لإعادة التدوير ومن ناحية ثانية تواجه عملية فصل خليط المواد البلاستيكية العديد من المشاكل بسبب اختلاف خصائص هذه المواد عن بعضها البعض، ومن أجل التعامل مع المشاكل التي تواجه

الصناعة فإن أعمال البحث تركّز قبل كل شيء على تصميم وتطوير واختبار مجموعة تقنيات للفصل والفرز قادرة على استرداد المواد البلاستيكية من النفايات والتي يمكن إعادة استخدامها أو إعادة معالجتها لتشكيل منتجات جديدة. وبهذا الخصوص فإن الفصل بالهواء أو الفصل بالتكهرب بالاحتكاك بالإضافة إلى أسلوب الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي عبارة عن طرق صناعية تقدم نتائج جيدة.

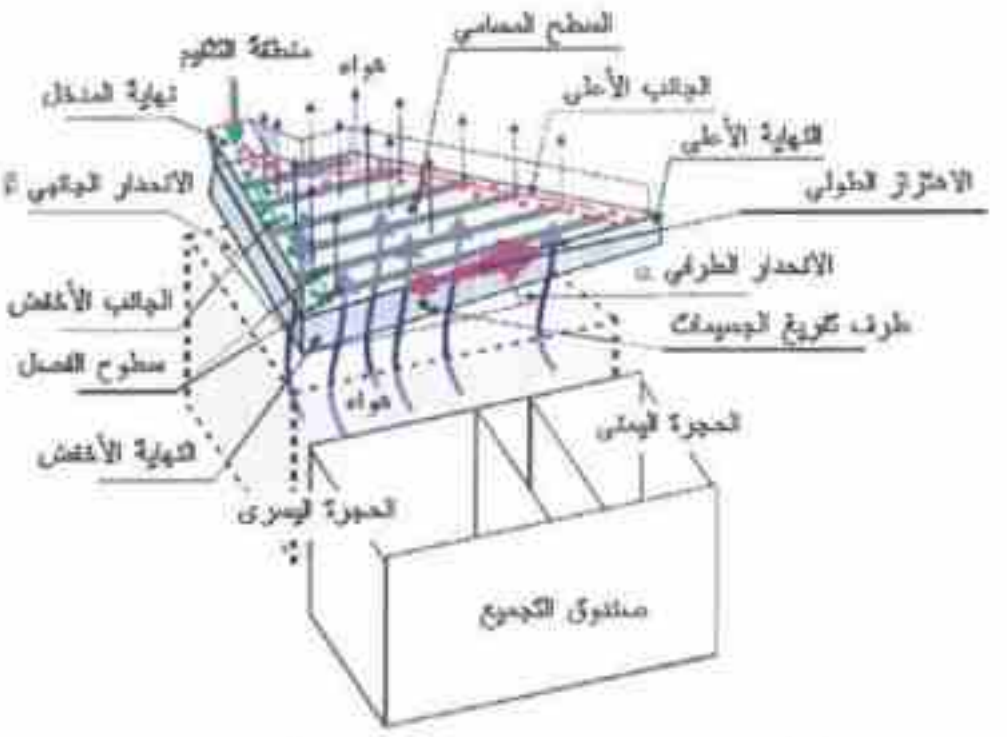
1.3 الفصل بالهواء Air Tabling

يعتمد أسلوب الفصل بالهواء على النقل الجاف، تتألف منضدة الهواء في الدرجة الأولى من قادوس التلقيم والملقم الهزاز وسطح مسامي يهتز بواسطة محرك لا مركزي لنقل الاهتزاز الطولي ومروحة هواء كهربائية توضع أسفل السطح المسامي لتوليد تيار هوائي صاعد (نحو الأعلى)، ويبين الشكل (1) رسم تخطيطي لجهاز الفصل، كما يوجد صندوق تجميع عند طرف التفريغ ويتألف من ثلاث حجرات منفصلة بفواصل توضع حسب تقديرات بصرية مبدئية. إن السطح المسامي المستوي ذو شكل شبه منحرف – المصنوع من الخشب ومواد مسامية – مزود بصفيحة مثقبة perforated plate بفتحات دائرية الشكل (نسبة مساحة الفتحات 11.8%) وبمجموعة سطوح فصل بارتفاع (7 mm) مرتبة بشكل موازي لاتجاه الاهتزاز الطولي، يبلغ قطر الفتحات (0.06 mm) وهو أصغر من حجم أصغر الجسيمات في الخليط بحيث تمنع الجسيمات من العبور خلالها. يمكن ضبط السطح المستوي بميلان عرضي وطولي مسبباً ما يسمى "انحدار جانبي" side slope و"انحدار طرفي" end slope على الترتيب كما هو مبين في الشكل (2)، كما يركب جهاز تحكم بالقرب من السطح بغية ضبط الانحدار الطرفي، والانحدار الجانبي للسطح وتواتر الاهتزاز الطولي والسرعة السطحية superficial velocity للهواء (الشكل 1).



الشكل (1) التصميم التخطيطي لمنضدة الهواء المخبرية

عند التشغيل يتم تلقيم المواد على السطح فتتشكل طبقة منتظمة من المادة، بسبب الاهتزاز الطولي للسطح والتيار الهوائي الصاعد تطاير وانتشار كامل الطبقة من المواد، مما يؤدي إلى ترسب الجسيمات عالية الكثافة على السطح لتمسه بينما تطفو الجسيمات منخفضة الكثافة أعلى الطبقة. عندئذٍ تهتز الجسيمات عالية الكثافة لأعلى السطح على طول الانحدار الطرفي نحو الجانب الأعلى، وفي نهاية كل شوط أمامي للاهتزاز فإن حركة السطح السمامي تنعكس بحدة (بسرعة)، إلا أن الجسيمات عالية الكثافة تستمر في الحركة إلى الأمام خلال المقدار الأكبر من الشوط الراجع (العكسي) بسبب عزمها الحركي المركب. يستمر الاهتزاز حتى تتدفق هذه الجسيمات على السطح عند نهايته الأعلى وتدخل إلى الحجرة اليمنى لصندوق التجميع (الشكل 2)، ومن الناحية الأخرى فإن الجسيمات منخفضة الكثافة تنجرف للأسفل باتجاه ميلان السطح نتيجة قوة الجاذبية وتتدفق على السطح عند نهايته الأخفض، عندها تتجمع الجسيمات منخفضة الكثافة في الحجرة اليسرى لصندوق التجميع (الشكلين 1 و 2).

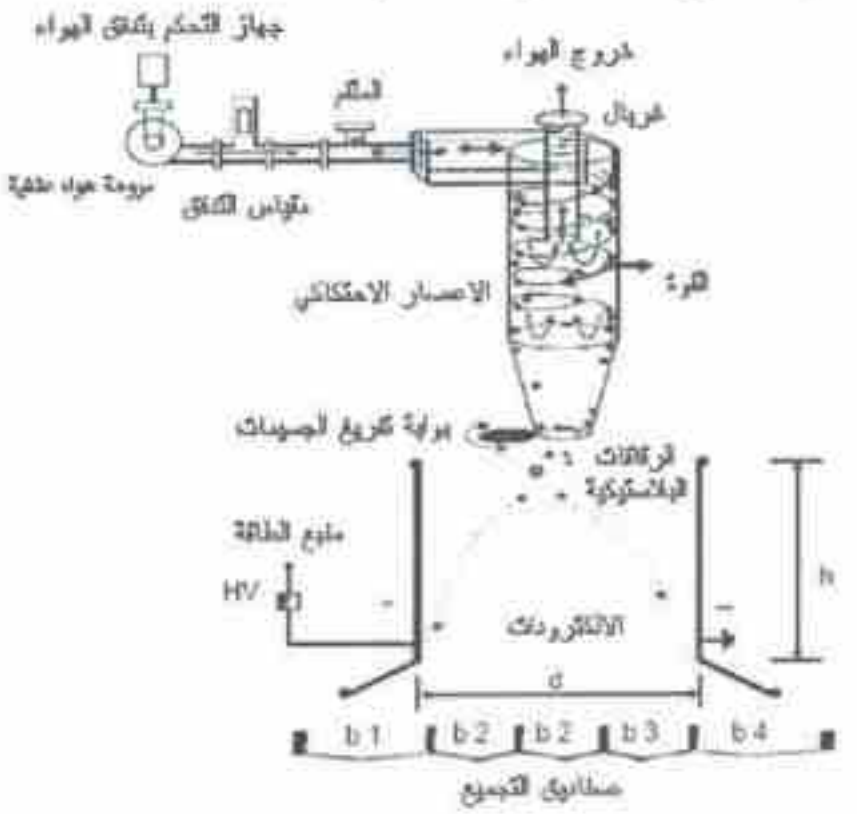


الشكل (2) يوضح الرسم التخطيطي مبدأ الفصل بالهواء

2.3 الفصل بالتكهرب بالاحتكاك Triboelectric Separation

يتألف جهاز الفصل بالتكهرب بالاحتكاك من ستة عناصر: الملقم ومروحة هواء عنفية والإعصار الحلزوني (ويسمى الإعصار الاحتكاكي)، والكترودين (قطبين كهربائيين) صفيحيين شاقوليين vertical-plate electrodes ومنبع طاقة للتيار المستمر DC وخمسة صناديق للتجميع. يُركب جهاز الفصل بالاحتكاك بالكهرباء داخل حجرة ذات تحكم بالرطوبة ودرجة الحرارة بغية الحفاظ على شروط ثابتة لكل من درجة الحرارة (T) والرطوبة النسبية للهواء (H). عند التشغيل تتناثر المواد الملقمة بفعل تيار هوائي تشكله مروحة الهواء العنفية وتدخل إلى داخل الإعصار الحلزوني الاحتكاكي على طول دخوله المماسي. يستخدم الهواء لنقل الخليط إلى داخل الإعصار الحلزوني الاحتكاكي ولتماسه مع التجويف الداخلي (البطانة) مسبباً الاحتكاك، وبعد مدة محددة من زمن الشحن الاحتكاكي (ويسمى زمن الحك أو زمن الاحتكاك rubbing time) تهبط الجسيمات البلاستيكية متعادلة الشحنة بحريّة إلى المنطقة بين الالكترودين، أما بقية الجسيمات فيتم سحبها إما إلى

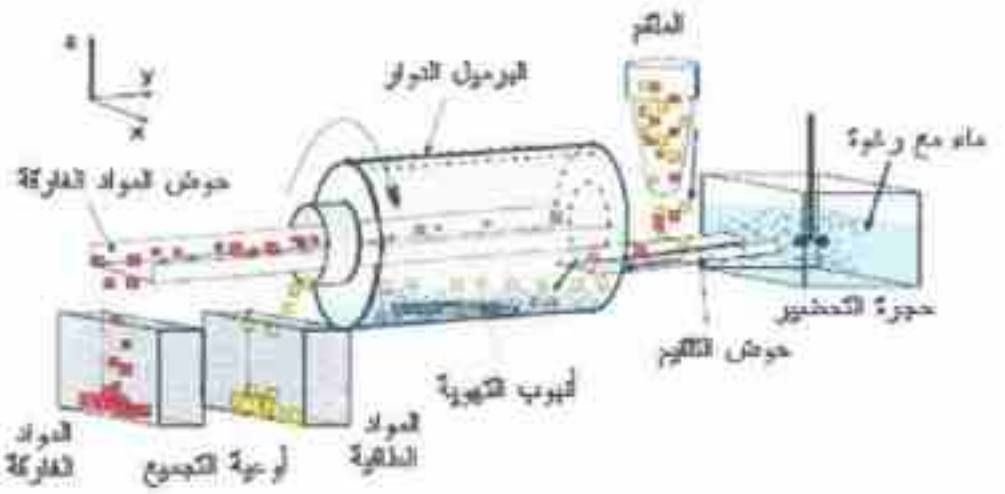
الالكترود الموجب أو إلى الالكترود السالب تبعاً لقطبية الشحنة التي تحملها وتنفصل بالهبوط في صناديق تجميع مختلفة (الشكل 3).



الشكل (3) التصميم التخطيطي لجهاز الفصل بالتكهرب بالاحتكاك

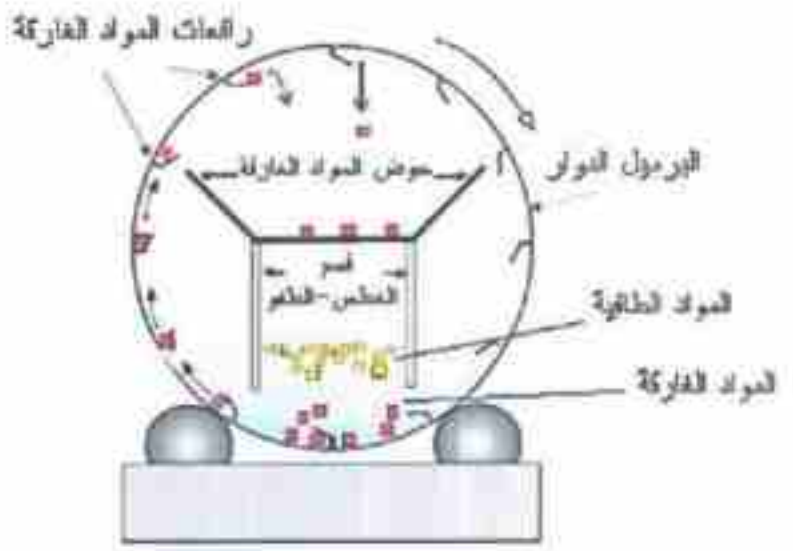
3.3 أسلوب الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي
Combination of Sink-Float Separation and Froth Flotation

كما يدل اسمها فإن هذه الطريقة هي دمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي بغية الحصول على مكونات الخليط بدرجة عالية من النقاوة، وذلك بالاستفادة من الاختلافات في الخصائص مثل الكثافة وزاوية الاتصال المباشر مع الماء (الجدول 1). يبين الشكل (4) جهاز الفصل والمؤلف من حجرة تحضير (خلية دنفر للطفو) وبرميل الفصل drum separator، كما يوجد – غير مبين في الشكل – حوض متوضع أسفل البرميل. يتدفق الماء من البرميل الدوار عبر أوعية التجميع إلى داخل الحوض، ومن هناك يتم ضخ الماء إلى حجرة التحضير ويتدفق مرة أخرى عائداً إلى داخل البرميل الدوار.



الشكل (4) التصميم التخطيطي لجهاز الفصل الذي يجمع بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي

يبين الجدول (1) أن للمواد البلاستيكية زاوية اتصال مع الماء كبيرة وهذا يبين الدرجة العالية من كره هذه المواد للماء hydrophobicity [3]، وبالتالي يتم معالجة الماء بكاشف ترطيب wetting reagent بغية تحديد العلاقة الكيميائية المائية التي تكون فيها أحد المواد البلاستيكية مسترطبة بينما يمكن أن تبقى المادة الأخرى في حالة كره للماء (نفور). عند التشغيل يتم تلقيم الخليط إلى داخل خلية التحضير ومزجه مع الماء (الشكل 4)، حيث تفيض الرقاقات من حجرة التحضير وتسقط إلى حوض التلقيم المؤدي إلى البرميل الدوار، إن قابلية الطفو لأحد مكونات الخليط تتم معالجتها أيضاً بضبط نظام الغطس – الطفو لذا يتضمن النظام أنبوب تهوية مغمور في الماء داخل البرميل (معدل جريان الهواء نحو $0.0054\ m^3/min$)، ترتفع المادة الطافية على سطح الماء ومن ثمّ تنتقل للأمام إلى نهاية البرميل حيث تتدفق إلى قناة التصريف وتسقط في وعاء المواد الطافية (الشكل 4)، وبنفس الوقت تقوم رافعات lifters مثبتة داخل البرميل الدوار بتجميع المواد الغارقة وتحملها إلى الأعلى حيث تسقط إلى داخل حوض المواد الغارقة (الشكل 5)، ومن ثمّ يتم نقل المواد الغارقة بواسطة تيار الماء (على طول حوض المواد الغارقة المائل) إلى وعاء المواد الغارقة (الشكل 4). ويتم تركيب غربال (حاجز شبكي) بفتحات عددها 20 داخل كل وعاء تجميع لتصريف الجسيمات التي تم فصلها.



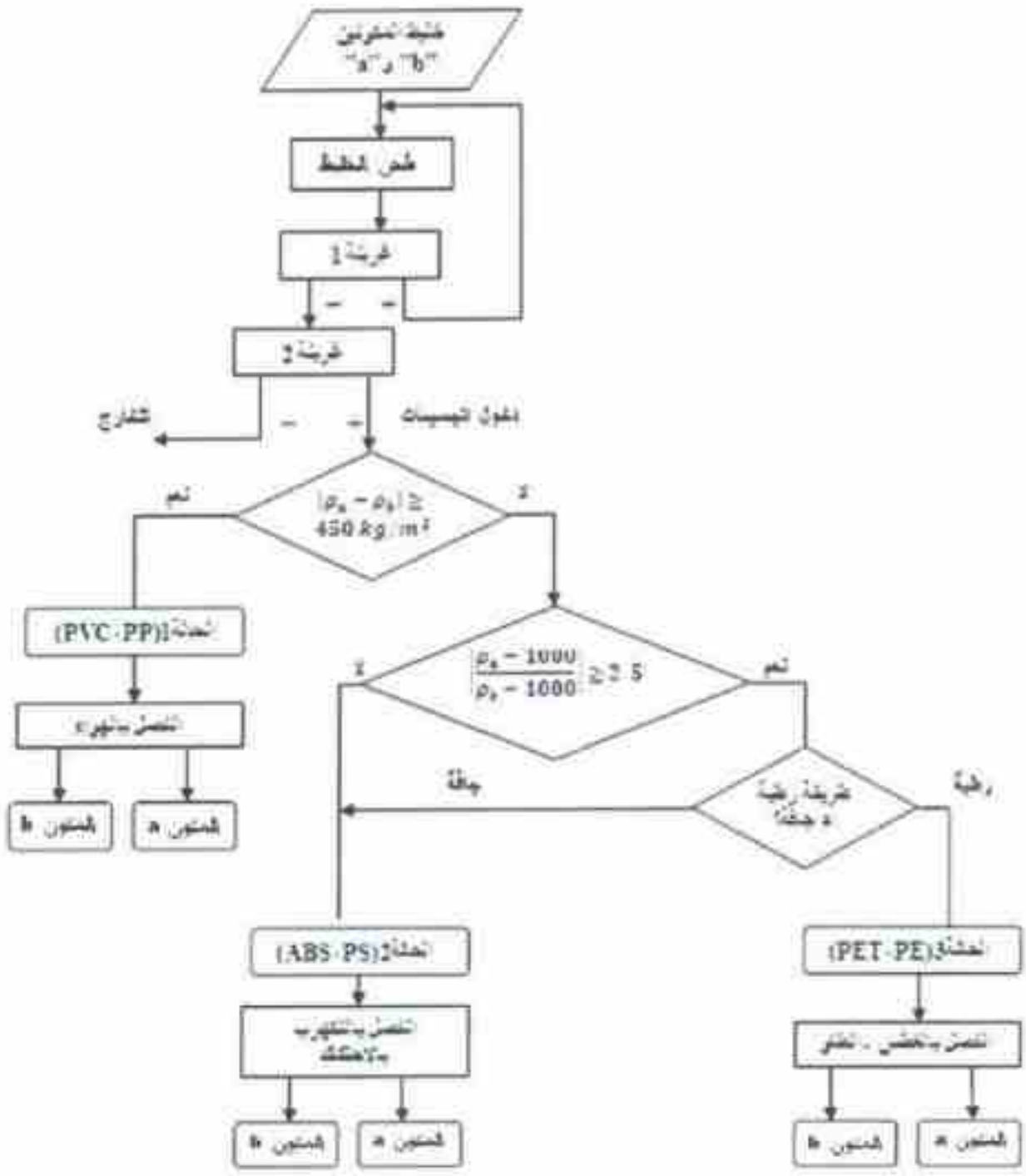
الشكل (5) التصميم التخطيطي لمنظر نهاية برميل الفصل

4. المبادئ الأساسية لاختيار الطريقة لفصل المواد البلاستيكية

Basic Principles for Choosing the Method for Separating Plastics

من أجل فصل الخليط البلاستيكي بفعالية لابد من اختيار أسلوب الفصل بعد تحليل دقيق لتركيب وخصائص المواد البلاستيكية المراد فصلها. حيث يبين الشكل (6) رسم تخطيطي لاختيار الطريقة الأكثر فعالية، كما يبين الشكل (6) أنه إذا كان الفرق بين كثافات المواد البلاستيكية المراد فصلها أكثر من 450 kg/m³ عندها تستخدم طريقة الفصل بالهواء، وإلا يتم التفكير في طريقة الفصل بالتكهرب بالاحتكاك أو طريقة الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي. كما يبين الشكل (6) أيضاً أنه إذا كان معيار التركيز ($C = \frac{\rho_2 - 1000}{\rho_1 - 1000}$) أقل من 2.5 kg/m³ عندها يكون الفصل بالتكهرب بالاحتكاك هو الخيار الوحيد [7]، وإلا فإن الاختيار بين طريقة الفصل بالتكهرب بالاحتكاك وطريقة الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي يعتمد على خصائص كل طريقة. وهنا لابد من ملاحظة أنه على الرغم من أن تقنيات الفصل الرطبة (بما فيها الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي) تزود بنتائج كافية، إلا أن الفصل بالحالة الجافة مفضلاً بيئياً، حيث أن هناك بعض المتطلبات المرتبطة بطرق الفصل الرطبة عامة مثل المعالجة الكيميائية المسبقة للمواد ومعالجة الماء المستخدم أثناء العملية بغرض إعادة الاستخدام أو

تفريغ الماء وإزالته أو تجفيف الخليط بعد فصله والتي يمكن تجنبها بعمليات الفصل الجافة.



الشكل (6) رسم تخطيطي لاختيار الطريقة لفصل المواد البلاستيكية (ρ_a و ρ_b ترمز إلى كثافات المكونات في الخليط)

سيتم شرح الأمثلة النموذجية لفصل الأنواع المختلفة لخليط المواد البلاستيكية مع الإجراءات التفصيلية للعملية، حيث تم إجراء الاختبارات على عينات اصطناعية تحوي 50%/50% من خليط PVC/PP وABS/PS وPET/PE.

يتم اختيار مكونات الخليط آنفة الذكر بسبب تواجد هذه المكونات مع بعضها البعض بشكل كبير في الخليط الخام (قارورة من مادة PET وغطاؤها من مادة PE)، ولاستخدامها في نفس التطبيقات وبالتالي صعوبة التمييز بين مكونات الخليط (وجود كلا المكونين ABS/PS في الأجهزة الالكترونية والمكونين PVC/PP في مواد البناء على سبيل المثال). كما يتم تنفيذ عملية الطحن بواسطة قطاعة shredder بعمود دوران واحد. يتم تصنيف الخليط المقطع تبعاً لحجم الرقاقات بواسطة عملية الغربلة التقليدية، وتستخدم الرقاقات البلاستيكية ذات الأشكال الغير منتظمة والتي يتراوح حجمها من (2.38 mm) إلى (3.36 mm) خلال العمل التجريبي.

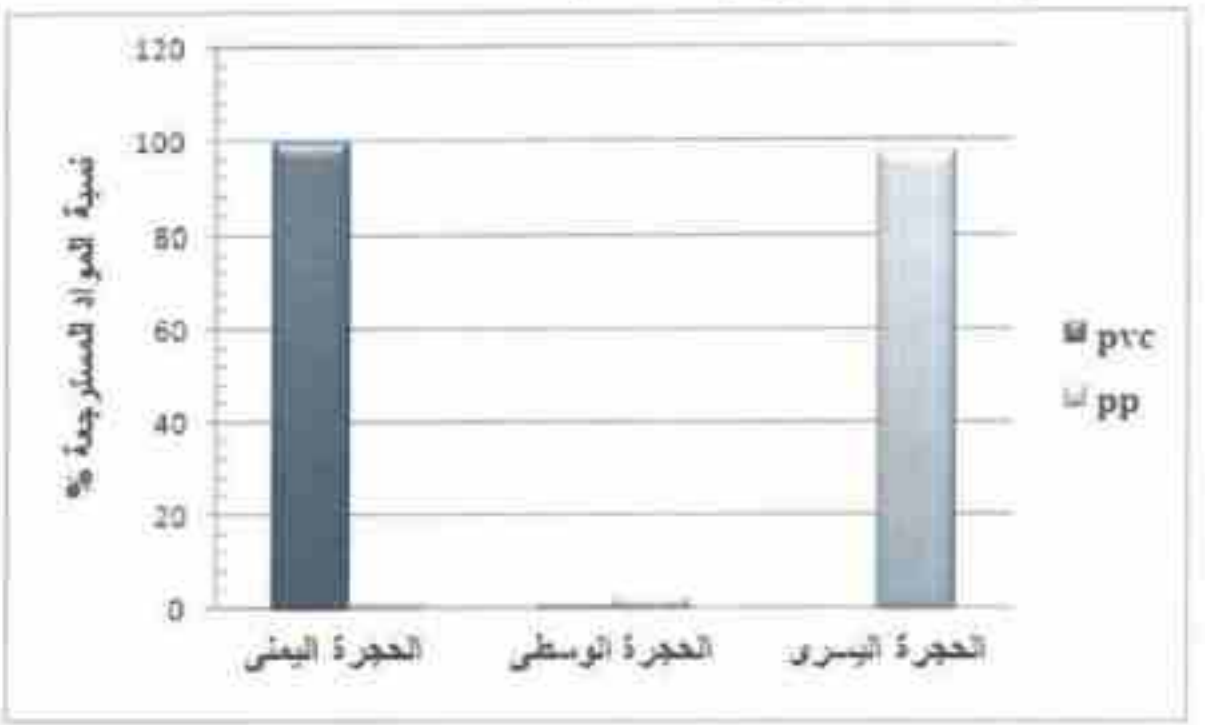
حيث يسمح الاختلاف في اللون بين الأنواع المختلفة للمواد البلاستيكية المستخدمة في الاختبار بفرز يدوي بسيط لكل مادة متدفقة من جهاز الفصل، ولا تتم أية معالجة خاصة للمواد الملقمة قبل التجربة. يتم حساب نسبة المواد المسترجعة recovery rate بالاستناد إلى كمية المواد التي يتم تلقيمها إلى جهاز الفصل.

1.4 إزالة PVC من خليط PVC/PP بواسطة طريقة الفصل بالهواء (الحالة 1)

إن عملية إزالة PVC هامة خصوصاً للمخلفات الناتجة عن أنظمة الوقود وذلك للتقليل من الديوكسين dioxin، لذا لابد سلفاً من إزالة PVC، خلال العمل التجريبي الحالي يتم فصل PVC من PP بواسطة طريقة الفصل بالهواء (الشكلين 1 و2) حيث أن هذه الطريقة فعالة في فرز المخلفات [6] وهي من التطبيقات التي تستغني عن استعمال الماء [7].

في هذا الاختبار يتم إبقاء متغيرات العملية ثابتة عند المقادير التالية: سرعة التيار الهوائي الصاعد $u = 1.6\ m/s$؛ تواتر الاهتزاز للسطح المسامي $f = 11.95\ s^{-1}$؛ الانحدار الطرفي $\alpha = 4.4°$؛ الانحدار الجانبي $\beta = 2.5°$؛ ارتفاع سطوح الفصل $h_1 = 7\ mm$. يبين الشكل (7) النتائج العددية لهذا الاختبار حيث يمكن ملاحظة أن 97.1% من مادة PP المنخفضة الكثافة قد تم

تجميعها في الحجرة اليسرى، من جهة أخرى تم تجميع 99.5% من مادة PVC العالية الكثافة في الحجرة اليمنى (الشكل 7).

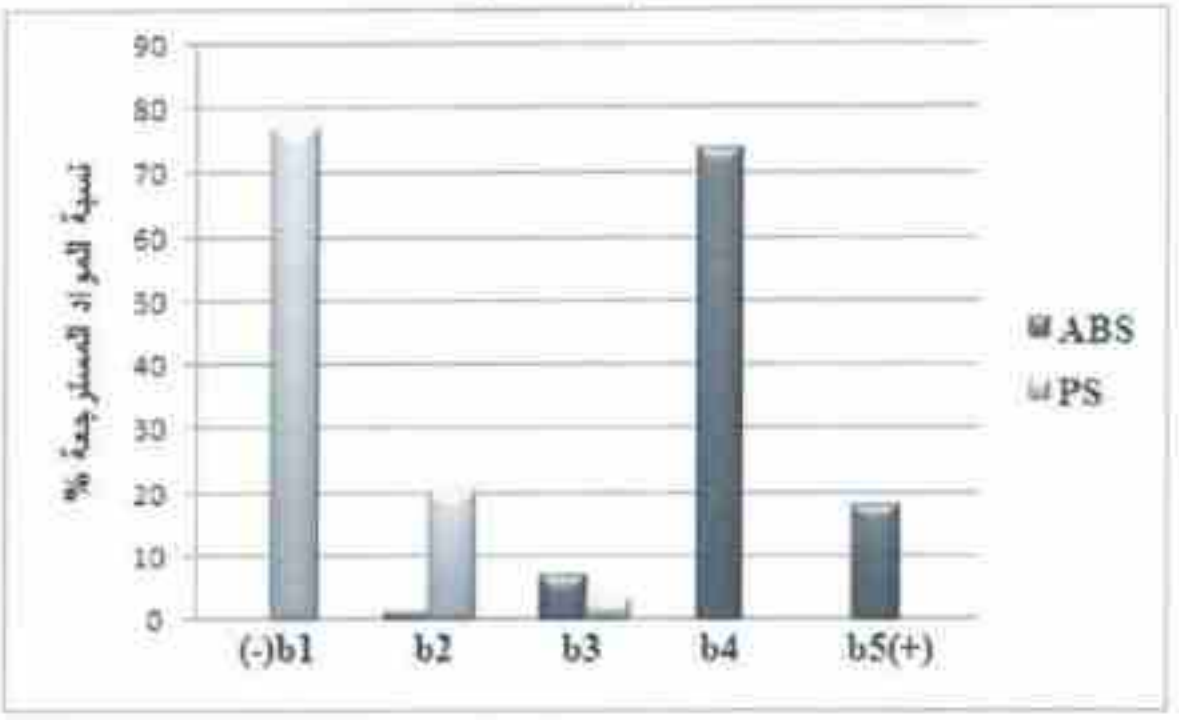


الشكل (7) نتائج فصل خليط PVC/PP بالهواء (الشروط التجريبية $u = 1.6\ m/s$، $(h_1 = 7\ mm$ ، $f = 11.95\ s^{-1}$ ، $\beta = 2.5°$ ، $\alpha = 4.4°$

2.4 الفصل بالتكهرب بالاحتكاك لـ ABS من خليط ABS/PS (الحالة 2)

تستعمل مادتي الأكريلونيتريل – بوتادين – ستيرين (ABS) والبولي ستيرين (PS) في المكونات الالكترونية ومواد البناء، يبين الجدول (1) أن لبوليميري ABS وPS كثافتين متماثلتين تقريباً ولذلك لا يمكن بلوغ نتائج مرضية لفصل ABS بطريقة الجاذبية التقليدية (ومثال على ذلك: منضدة الهواء)، وهكذا يتم اللجوء إلى الفصل بالتكهرب بالاحتكاك بغية فصل هذا الخليط البلاستيكي الدقيق (الشكل 3). يمكن تحديد القاعدة الأساسية للفصل بالتكهرب بالاحتكاك لخليط ثنائي فيما إذا كانت مكونات الخليط تكتسب شحنات متعاكسة القطبية، إن مقياس القطبية هو سلسلة التكهرب بالاحتكاك (الجدول 1). وبغية شحن مكونات الخليط ABS/PS بشكل انتقائي يتم تصنيع البطانة الداخلية للإعصار الحلزوني الاحتكاكي (أو ما يسمى بسطح الشحن) tribo-cyclone من مادة PET والتي ترتيبها في سلسلة التكهرب بالاحتكاك (الجدول 1) بين ABS وPS، وهكذا في نهاية هذه العملية

تُشحن رقاقات ABS بشحنة موجبة وتُجمع في الصناديق القريبة من الالكترود السالب بينما تُشحن رقاقات PS بشحنة سالبة وتُجمع في الصناديق على الجهة المقابلة القريبة من الالكترود الموجب (الشكل 3).



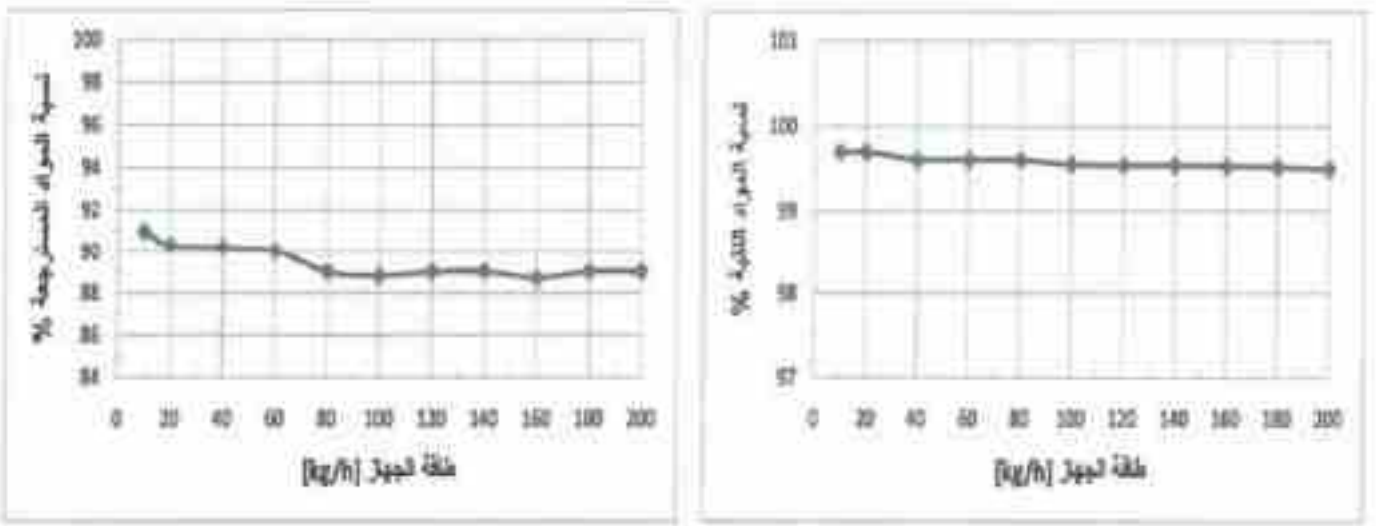
الشكل (8) الفصل بالتكهرب بالاحتكاك ABS/PS: نسبة المواد المسترجعة في الصناديق الخمسة (الشروط التجريبية: $T = 29°C$، $H = 49\%$، $v = 15.5\ m/s$، $t = 60\ s$، سطح الشحن من PET، $E = 240\ kV/m$)

في هذا الاختبار يتم الحفاظ على متغيرات العملية عند مقادير ثابتة وهي: سرعة الحك (الاحتكاك) $v = 15.5\ m/s$، زمن الاحتكاك $t = 60\ s$، شدة الحقل الكهربائي $E = 240\ kV/m$، درجة الحرارة $T = 29°C$، والرطوبة $H = 49\%$. من النتائج المبينة في الشكل (8) يمكن ملاحظة أن الصناديق "b4" و"b5" (القريبة من الالكترود السالب) تجمعت فيها رقاقات ABS النقية بينما الصناديق "b1" و"b2" تجمعت فيها رقاقات PS المشحونة بشحنة سالبة، أما الجسيمات الأخرى والمجمعة في "b3" (وبمعنى آخر: المعتدلة الشحنة) لا يتم معالجتها مرة أخرى في مراحل لاحقة.

3.4 فصل PET من خليط PET/PE بطريقة الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي (الحالة 3)

يستخدم PET على نطاق واسع في إنتاج قوارير المشروبات اللاكحولية، وهو من المواد البلاستيكية الفعالة والتي يمكن إعادة استخدامها بسهولة كمادة خام لإنتاج منتجات أخرى من PET، بما أن الخليط الخام يتضمن عادةً أنواع أخرى من المواد البلاستيكية وبشكل خاص مادة PE والتي تصنع منها أغطية القوارير، فإن فصل خليط PET/PE أمر لا بد البحث فيه، خلال العمل التجريبي الحالي يتم استخدام جهاز فصل يضم كل من الفصل بالغطس – الطفو والفصل بالطفو الرغوي لاسترجاع PET من خليط PET/PE (الشكلين 4 و5).

إن كثافة PE (kg/m^3 960–910) أقل من كثافة الماء (kg/m^3 1000) ولذلك فإن PE يطفو في الماء، وعلى أية حال إن الوسط (أي الماء) مجهز بكاشف ترطيب (دوديسيل أمين أسيتات) بتركيز kg/m^3 0.02؛ وذلك بهدف زيادة قابلية الطفو لمادة PE وجعلها مسترطبة، وبالنتيجة تلتصق رقاقات PE بسهولة بفقاعات الهواء مما يُعزز قابليتها للطفو، من الناحية الأخرى تبقى مادة PET بحالة مقاومة وكره للماء وتغوص فيه وذلك لأن كثافتها (kg/m^3 1350) أكبر من كثافة الماء.



b a

الشكل (9) الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي بغية فصل خليط PET/PE: درجة نقاء (المخطط a) ونسبة استرجاع (المخطط b) مادة PET كتابع للطاقة الإنتاجية للبرميل الدوار

يبين الشكل (9) النتائج التجريبية لخليط PET/PE حيث يمكن ملاحظة انخفاض نسبة استرجاع PET (أي الجسيمات الغارقة) بزيادة طاقة الجهاز، ومع ذلك يمكن الوصول إلى معدل استرجاع لمادة PET 90.3% ودرجة نقاء للمادة بنسبة 99.7% عندما تكون طاقة (مردود) جهاز الفصل 20 hg/h (الشكل 9).

5. الاستنتاجات Conclusions

تم عرض ثلاثة نماذج مختلفة من أساليب الفصل للمواد البلاستيكية ودليل عام لكيفية اختيار الطريقة الأكثر فعالية لفرز خليط المواد البلاستيكية، كما تم توضيح فعالية هذه الطرق من خلال سلسلة من الاختبارات لفصل PVC وABS وPET من خليط PVC/PP وABS/PS وPET/PE على الترتيب، وذلك بهدف تحسين نقاوة المواد الخام المستخدمة في إعادة التدوير الميكانيكية أو إعادة التدوير بالتحويل إلى المواد الأولية. بالأخذ بالاعتبار النتائج المذكورة في البحث فإن الفصل بالهواء ملائم لاسترجاع PVC من خليط PVC/PP بفعالية حيث تم استرجاع 97.1% من PVC، كما برهنت النتائج التجريبية أيضاً على فعالية الفصل بالتكهرب بالاحتكاك حيث تم استخدامها لشحن ومن ثمّ فصل خليط ABS/PS حيث تمتلك مكونات هذا الخليط كثافات متماثلة، هذه الطريقة قادرة على فصل 92% من مواد ABS، وأخيراً تم فصل خليط PET/PE بشكل انتقائي باستخدام طريقة الدمج بين الفصل بالغطس – الطفو والطفو الرغوي حيث كان معدل نقاء مادة PET 99.7%.

6. المراجع References

المراجع العربية

[1] وزارة الدولة لشؤون البيئة وشركة تريفالور الفرنسية، 2010 - **المخطط التوجيهي العام لإدارة النفايات في الجمهورية العربية السورية.**

المراجع الأجنبية

[2] DODBIBA G.; SHIBAYAMA A.; MIYAZAKI T.; et al. 2003 - **Triboelectrostatic Separation of ABS, PS and PP Plastic Mixture.** Mater, Trans., 44(1): 1–6.

[3] FUJITA T.; HARUKI N.; DODBIBA G.; et al. 2000 - **Various Kinds of Plastics and Paper Separation Using Electrostatic Separation and the Combination of Sink–Float Separation and Flotation for Recycling.** Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, Rome, Italy, B12a-1–12a-8.

[4] FUJITA T.; IMAI M.; HARUKI N.; et al. 1999 - **Electrostatic Separation of Various Kinds of Plastics and Papers.** Proceedings of Fifth International Symposium on East Asian Recycling Technology, Tsukuba, Japan.

[5] MURAKAMI O., 2001 - **Technology for Recycling Plastic Materials.** Mitsubishi Electric Advance Magazine, Japan.

[6] OI E.; KIKUCHI E.; ARAI S.; et al. 1997 - **Separation of Polyvinyl Chloride Resin from Shredded Electric Wire Scrap Using Air Table.** Proceeding of 4th International Symposium on East Asian Resource Recycling Technology, China.

[7] WILLS A. 1997 - **Mineral Processing Technology**, 6th Edition, Butterworth-Heinemann, 228–232.

Comparison of some Sorting Techniques for Plastics Recycling

Abstract:

This paper presents the basic principles of three different types of separating methods and a general guideline for choosing the most effective method for sorting plastic mixtures. It also presents the results of the tests carried out for separation of PVC, ABS and PET from different kinds of plastic mixtures in order to improve the grade of the raw input used in mechanical or feedstock recycling.

Key words: plastics; sorting; separation; recycling; recovery.