

Fifty years ago no one would have thought that someday microbial degradation of plastic waste would be commonly used

What would our modern life be like without plastic? Plastics are at our fingertips all day long: polymeric framed computer monitors and keyboards, polymeric construction materials, polymeric food storage containers and kitchen ware, polymeric clothes and sports equipment, polymeric medical supplies, and ...

The amount of plastic we encounter every day doesn't end there, however. Plastic is flexible, resilient, and sustainable. Plastic is a commonplace and inexpensive solution for many of us. But, plastic is not without its flaws. The characteristics that make plastic successful, such as durability, light weight and low cost, also make its disposal difficult and problematic. Where does all this plastic go when we're done with it? Quite a bit ends up in landfills, where it can persist for hundreds of years, if not indefinitely. And more than we can imagine ends up on the loose as plastic pollution, eventually making its way into our waterways.

Oceanic plastic pollution is a recent, worldwide and anthropogenic catastrophe. It is persistent, pervasive and pernicious. Once the plastic gets into the estuaries, shallow seas and deep oceans it causes harm to the seawater ecosystems and organisms, damages coastal economies, perturbs leisure activities, and ultimately affects human health [Plastic Oceans - <http://www.plasticoceans.net>]. The United Nations Environment Programme report [2006], Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas, argues that well over 60 % of the marine world and its rich biodiversity is vulnerable and increasingly at risk. In the epipelagic upper layer of the Central Pacific Ocean, for instance, there are up to 6 kilos of marine litter to every kilo of plankton.

Polyethylene is a common petroleum-based plastic; it is widely used in our everyday life.

Some 100 million tonnes of polyethylene (PE) are manufactured each year, making it one of the most widely used plastics [<http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>]. PE uses include films, packagings and all kinds of containers, such as bottles and buckets. However, the obvious contrast between the remarkable durability and the short service time of PE products leads to a dramatic accumulation of its waste in the environment.

Since the early 1970s, tests on the biodegradation of virgin PE have been performed [Jones et al. 1974]. Several early studies concluded that the biodegradation of virgin PE is very limited. However, when PE samples were pretreated with UV light or thermo-oxidation, polymerization of the PE chains occurred and resulted in the formation of low molecular weight products, including alkanes, alkenes, ketones, aldehydes, various alcohols, and fatty acids, which can ultimately be degraded by microorganisms. To date, one still aims to discover PE-degrading microorganisms through tests involving plastic-waste-contaminated soils, landfills, compost, as

well as marine matter. Several bacterial strains have been isolated [Yang et al. 2014 and references herein]. Based on the characterization of biofilm formation on PE films, weight loss of PE materials, surface deterioration, and changes in the mechanical and thermal properties of PE. It was obvious that some strains showed a moderate ability to use virgin PE as a carbon source.

Yang et al. [2014] found that the pest larvae of *Plodia interpunctella*, commonly known as Indian mealmoths, can damage PE packing films by chewing and eating the film. The results of the investigation confirmed PE biodegradation by two gut bacteria isolated from mealmoth worms; they indicated that the bacteria from these plastic-chewing insect larvae were a promising source of plastic-degrading microorganisms.

Polystyrene provides us with a wide variety of uses, especially as a cheap, lightweight insulation and as containers for taking food to go. Similarly to PE, there is a remarkable contrast between the pronounced durability of polystyrene (PS) products and their short service times. PS biodegrades so slowly that it can sit in a landfill for hundreds of years. New findings by Yang et al. [2015a & 2015b] point to a potential solution. Mealworms — the larval form of *Tenebrio molitor*, commonly known as the yellow mealworm — will dine on polystyrene foam when they can't get a better meal, converting up to 48 % of what they eat into carbon dioxide.

Fed with PS as their sole diet, the larvae lived as well as those fed with a normal bran diet over a period of 1 month. The analysis of fecula egested from styrofoam-feeding larvae, substantiated that cleavage and/or depolymerization of long-chain PS molecules and the formation of depolymerized metabolites occurred in the larval gut [Yang et al. 2015a].

A PS-degrading bacterial strain was isolated from the guts of the mealworms, which could form biofilm on PS film over a 28 day incubation period and, moreover, it made obvious pits and cavities on PS film surfaces associated with decreases in hydrophobicity and the formation of C–O polar groups. The molecular weight of the residual PS pieces was lower after incubation with bacteria, and the release of water-soluble daughter products of PS was detected. These research results indicate the essential role of gut bacteria in PS biodegradation and mineralization, and confirmed their presence in mealworms [Yang et al. 2015b].

Polyethylene terephthalate plastics also have numerous industrial as well as consumer related uses. Polyethylene terephthalate (PET) is used extensively worldwide. It is commonly used in bottles and other food containers. This includes soft drinks, bakery products, peanut butter and even frozen foods. It is often used to hold cosmetics too; since it is easy to mold; manufacturers can create very specific shapes for a variety of cosmetic products. And it is commonly used for the storage of chemicals, including the household cleaners everybody needs.

PET accumulation in the environment has become a global concern. By screening natural microbial communities exposed to PET in the environment, Yoshida et al. [2016] isolated a novel bacterium, *Ideonella sakaiensis*, that is able to use PET as its major energy and carbon source. A

community of *Ideonella sakaiensis* bacteria could break down a thin film of PET in just six weeks if kept at a temperature of 29 C.

When grown on PET, these bacteria produce two enzymes capable of hydrolyzing PET and its reaction intermediate, mono(2-hydroxyethyl) terephthalic acid. Both enzymes are required to enzymatically convert PET efficiently into its two environmentally benign monomers, terephthalic acid and ethylene glycol.

Do we have a solution for the worldwide plastic pollution? Obviously, we still need more time to improve our understanding. Previous studies have detected fungi species able to grow on plastic. Now, microbes were found to be able to consume the substance. This revelation has led experts to expect that bacterial strains could be the answer to the ever-growing amount of plastic ending up in the environment and damaging the planet.

At this point, we can only stand back, cross our fingers and hope the bacteria can clean up the world!

References

Jones et al. [1974]. Biodegradability of photodegraded polymers. I. Development of experimental procedures, *Environmental Science and Technology* 10, 919 – 923

UNEP [2006]. Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas

Yang et al. [2014]. Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic-Eating Waxworms, *Environmental Science and Technology* 48, 13776 – 13784

Yang et al. [2015a]. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests, *Environmental Science and Technology* 49, 12080 – 12086

Yang et al. [2015b]. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms, *Environmental Science and Technology* 49, 12087 – 12093

Yoshida et al. [2016]. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate), *Science* 351, 6278, 1196 – 1199

Vijftig jaar geleden zou niemand eraan gedacht hebben dat de microbiële degradatie van plastic afval ooit vaak gebruikt zou worden

Hoe zou ons modern leven eruit zien zonder plastic? Plastics hebben we de hele dag bij de hand: kunststoffen computerschermen en toetsenborden, kunststoffen bouwmaterialen, kunststoffen voedselcontainers en keukengerei, kunststoffen kledij en sportuitrustingen, medische apparatuur in kunststof, en ...

Maar de hoeveelheid kunststof die we elke dag waarnemen stopt hiermee niet. Plastic is buigzaam, veerkrachtig en duurzaam. Plastic is een alledaagse en goedkope oplossing voor velen onder ons. Maar het is niet zonder gebreken. De kenmerken die kunststof zo succesvol maken, zoals duurzaamheid, lichtgewicht en lage kost zijn precies de kenmerken die de verwijdering ervan moeilijk en problematisch maken. Waar gaat al dat plastic heen wanneer we ermee klaar zijn? Een deel ervan komt op stortplaatsen terecht en daar kan het honderden jaren achterblijven, of zelfs voor eeuwig en altijd. En heel wat meer dan we vermoeden eindigt als zwerfvuil, zelfs tot in onze waterlopen.

De plastic verontreiniging van de oceanen is een recente en wereldwijde catastrofe, door de mens zelf veroorzaakt. Ze is persistent, alomtegenwoordig en schadelijk. Eenmaal het plastic in estuaria, ondiepe zeeën en diepe oceanen terechtkomt, tast het mariene ecosystemen en organismen aan, berokkent het schade aan kusteconomieën, verstoort het onze waterpret en uiteindelijk ook de menselijke gezondheid [Plastic Oceans - <http://www.plasticoceans.net>]. Het rapport van het United Nations Environment Programme [2006], getiteld Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas, wijst erop dat ruim 60 % van de mariene wereld en zijn rijke biodiversiteit kwetsbaar is en zelfs een verhoogd risico loopt. In de epipelagische bovenlaag van de centrale Stille Oceaan bevindt er zich, bij voorbeeld, 6 kilogram afval voor elke kilogram plankton.

Polyethyleen is een veel voorkomende en uit aardolie gewonnen kunststof; het wordt vaak gebruikt in ons leven van elke dag. Zo'n 100 miljoen ton polyethyleen (PE) worden ieder jaar aangemaakt en daardoor is het een van de meest gebruikte plastics [<http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>]. PE gebruikt men voor folies, verpakkingen en allerhande containers, zoals flessen en emmers. Maar het sterke contrast tussen de opvallende duurzaamheid en de korte gebruikstijd van PE-producten leidt tot een dramatische opstapeling van afval in het milieu.

Sinds het begin van de jaren 70, werden er biodegradatietesten uitgevoerd op virgin PE [Jones et al. 1974]. Meerdere studies tonen aan dat de biodegradatie van PE zeer beperkt is. Wanneer de PE-monsters evenwel vooraf werden behandeld met UV-licht of met thermo-oxydatie, treedt er depolymerisatie van de PE-ketens op. Dat resulteerde in de vorming van producten met een laag moleculair gewicht, zoals alkanen, alkenen, ketonen, aldehyden, verschillende alcoholen en vetzuren, die nadien kunnen afgebroken worden door micro-organismen. Vandaag streeft men er nog steeds naar micro-organismen, die PE kunnen afbreken, te ontdekken met testen op monsters van bodems, stortplaatsen, compost en marien materiaal, die met plastic afval waren

verontreinigd. En er werden verschillende bacteriestammen geïsoleerd [Yang et al. 2014 en referenties hierin]. Op basis van kenmerken zoals biofilmvorming op PE-folies, gewichtsverlies van PE-materiaal, deterioratie van het oppervlak en wijzigingen in de mechanische en thermische eigenschappen van het PE, was het duidelijk dat enkele stammen een beperkte capaciteit vertoonden om virgin PE te gebruiken als koolstofbron.

Yang et al. [2014] vonden dat de larven van het insect *Plodia interpunctella*, dat wij de Indische meelmot noemen, PE-verpakkingsfilms kunnen beschadigen door erop te kauwen en ze op te eten. De resultaten van het onderzoek geven aan dat de biodegradatie van PE veroorzaakt wordt door twee bacteriën uit het spijsverteringskanaal van de mot. Overigens toonden de onderzoekers aan dat de bacteriën van dergelijke plasticvreter beloftevolle micro-organismen zijn voor de afbraak van plastic.

Polystyreen voorziet ons ook van een grote waaier aan toepassingen, in hoofdzaak als goedkoop en lichtgewicht isolatiemateriaal en recipiënten voor voeding uit het vuistje. Net zoals voor PE is er een opvallend contrast tussen de uitgesproken duurzaamheid van polystyreen (PS) en zijn korte gebruikstijd. PS breekt zo traag af dat het honderden jaren op stortplaatsen aanwezig kan blijven. Maar nieuwe bevindingen van Yang et al. [2015a & 2015b] wijzen op een mogelijke oplossing. Meelwormen — de larvale vorm van *Tenebrio molitor* — dineren met polystyreenschuim wanneer er geen betere maaltijd is en zetten daarbij tot 48 % van wat ze eten om in koolstofdioxide.

Met enkel PS als voeding leefden de wormen even goed voor een periode van 1 maand als deze die een normale voeding van zemelen aangeboden kregen. De analyse van de uitwerpselen van de wormen, die gevoed werden met PS-schuim bevestigden dat opsplitsing en/of depolymerisatie van lange keten-moleculen plaatsvond in het spijsverteringskanaal van de larven [Yang et al. 2015a].

Men heeft een bacteriestam afgezonderd uit het spijsverteringskanaal van de meelwormen die in een incubatieperiode van 28 dagen een biofilm kon vormen op PS-folie. En bovendien werden putjes en holtes in de PS-folie merkbaar, samen met een verminderde hydrofobiciteit en de vorming van C-O polaire groepen. Het moleculair gewicht van het overblijvend PS was lager na incubatie met bacteriën en de afgave van wateroplosbare dochterstoffen van PS werd aangetoond. Deze onderzoeksresultaten tonen aan dat bacteriën uit het spijsverteringskanaal een essentiële rol spelen in de biodegradatie en mineralisatie van PS; ze bevestigen trouwens de aanwezigheid van deze bacteriën in meelwormen [Yang et al. 2015b].

Polyethyleentereftalaat heeft ook een groot aantal toepassingen zowel voor de industrie als voor de gewone consument. Polyethyleentereftalaat (PET) wordt wereldwijd op grote schaal gebruikt, meestal wordt het gebruikt voor flessen en andere voedingscontainers. Hierin zitten de frisdranken, bakkerijproducten, pindakaas en zelfs diepvriesproducten. Het wordt ook vaak gebruikt voor cosmetica, omdat het gemakkelijk vervormd kan worden; de producenten kunnen zeer specifieke vormen creëren voor een grote verscheidenheid aan cosmetische producten. En

PET wordt ook veelvuldig gebruikt voor chemicaliën, ook de schoonmaakproducten die we allen nodig hebben.

De opstapeling van PET in het milieu is wel een wereldprobleem geworden. Door opsporing van natuurlijke populaties van bacteriën, die in het milieu blootgesteld zijn aan PET, zijn Yoshida et al. [2016] erin geslaagd een nieuwe bacterie, *Ideonella sakaiensis*, te isoleren die in staat is PET te gebruiken als hoofdbron voor energie en koolstof. Een *Ideonella sakaiensis* populatie kan in nauwelijks zes weken tijd een dunne PET-folie afbreken bij een temperatuur van 29 C.

Met PET als voedingsbodem zijn deze bacteriën in staat twee enzymen te produceren waarmee PET evenals het intermediair reactieproduct mono(2-hydroxyethyl)tereftaalzuur kunnen gehydrolyseerd worden. Beide enzymen zijn noodzakelijk om PET op een efficiënte manier om te vormen tot zijn twee milieuvriendelijke monomeren, tereftaalzuur en ethyleenglycol.

Hebben we nu een oplossing voor de wereldwijde plastic verontreiniging? Het is duidelijk dat we nog wat tijd nodig hebben om onze kennis te verbeteren. Eerdere studies toonden aan dat schimmels kunnen groeien op plastic. Nu werden er microben ontdekt die plastic eten. Dit heeft de experts ertoe geleid te verwachten dat bacteriestammen wel eens het antwoord zouden kunnen zijn voor de steeds maar toenemende massa plastic die in het milieu terecht komt en zo onze planeet vernielt.

Op dit ogenblik kunnen we enkel achterover leunen, duimen voor de toekomst en hopen dat bacteriën onze wereld kunnen opkuisen!

Referenties

Jones et al. [1974]. Biodegradability of photodegraded polymers. I. Development of experimental procedures, *Environmental Science and Technology* 10, 919 – 923

UNEP [2006]. Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas

Yang et al. [2014]. Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic-Eating Waxworms, *Environmental Science and Technology* 48, 13776 – 13784

Yang et al. [2015a]. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests, *Environmental Science and Technology* 49, 12080 – 12086

Yang et al. [2015b]. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms, *Environmental Science and Technology* 49, 12087 – 12093

Yoshida et al. [2016]. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate), *Science* 351, 6278, 1196 – 1199

Il y a cinquante ans, personne n'aurait pensé que la dégradation microbienne des déchets plastiques serait un jour couramment utilisée

Comment notre vie moderne serait-elle sans plastique? Les matières plastiques, toute la journée nous les avons à portée de main: écrans et claviers d'ordinateurs en plastique, matériaux de construction en plastique, récipients pour aliments et ustensiles de cuisine en plastique, vêtements et équipements de sport synthétiques, fournitures médicales en plastique, et ...

Mais la quantité de plastique que nous rencontrons tous les jours, ne s'arrête pas là. Le plastique est souple, résistant et durable. Le plastique est une solution courante et bon marché pour beaucoup d'entre nous. Mais il n'est pas sans défauts. Les caractéristiques qui font la réussite du plastique, comme la durabilité, le léger poids et les faibles coûts sont exactement les caractéristiques qui rendent sa destruction difficile et problématique. Où va tout ce plastique après utilisation? Une partie se retrouve dans les décharges et là il peut rester pendant des centaines d'années, sinon indéfiniment. Et beaucoup plus que nous le soupçonnons il finit comme litière, même dans nos cours d'eau.

La pollution plastique des Océans est une catastrophe récente et globale, provoquée par l'homme lui-même. Elle est persistante, envahissante et nuisible. Une fois arrivé dans les estuaires, les mers peu profondes et les océans profonds, le plastique affecte les écosystèmes et les organismes marins, nuit les économies côtières, perturbe les loisirs et en fin également la santé humaine [Plastic océans-<http://www.plasticoceans.net>]. Le rapport du programme des Nations Unies pour l'environnement [2006], intitulé « Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas », souligne que plus de 60 % de monde marin et de sa riche biodiversité est vulnérable et de plus en plus à risque. Dans la couche superficielle épipélagique de l'océan Pacifique Central il y a, par exemple, 6 kilogrammes de déchets pour chaque kilogramme de plancton.

Le polyéthylène est un plastique très commun, à base de pétrole; il est largement utilisé dans notre vie de tous les jours. Environ 100 millions de tonnes de polyéthylène (PE) sont synthétisées chaque année et pour cette raison, c'est un des plastiques les plus utilisés [<http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>]. Le PE est utilisé pour les films, les emballages et toutes sortes de conteneurs, tels les bouteilles et les seaux. Mais le fort contraste entre la durabilité remarquable et le court temps d'utilisation des objets en PE mène à une accumulation dramatique des déchets dans l'environnement.

Depuis le début des années 70, des essais de biodégradation ont été effectués avec le PE vierge [Jones et al. 1974]. De nombreuses études montrent que la biodégradation du PE est très limitée. Toutefois, lorsque les échantillons de PE étaient préalablement traités à la lumière UV ou avec une oxydation thermique, la dépolymérisation des chaînes de PE se manifestait. Ceci résultait en la formation de substances de faible poids moléculaire, tels les alcanes, alcènes, cétones, aldéhydes, divers alcools et acides gras, qui peuvent ensuite être décomposés par des

micro-organismes. Aujourd'hui on vise toujours à découvrir des micro-organismes qui peuvent décomposer le PE en effectuant des tests sur des échantillons de sols, de sites d'enfouissement, de compost et de matériaux marins, contaminés par des déchets plastiques. Différentes souches bactériennes ont été isolées [Yang et al., 2014 et références y incluses]. Sur base de caractéristiques telles la formation de biofilms sur les films en PE, la perte de poids du matériau PE, la détérioration de la surface et les changements en caractéristiques mécaniques et thermiques du PE, il était clair que quelques souches montraient une faible capacité d'utiliser le PE vierge en tant que source de carbone.

Yang et al. [2014] ont trouvé que les larves de l'insecte *Plodia interpunctella*, que nous appelons la pyrale indienne des fruits secs, peuvent abîmer les films d'emballage en PE par la mastication et en les mangeant. Les résultats de l'étude indiquent que la biodégradation du PE est causée par deux bactéries du tube digestif des larves. Les chercheurs ont d'ailleurs mis en évidence que les bactéries de ces gloutons de plastique sont des microorganismes prometteurs pour la décomposition du plastique.

Le polystyrène nous offre également un large éventail d'utilisations, principalement comme matériau d'isolation léger et bon marché et comme récipients pour plats à manger sur le pouce. Comme pour le PE, il y a un contraste frappant entre la durabilité du polystyrène (PS) et sa courte durée d'utilisation. Le PS se décompose si lentement qu'il peut rester des centaines d'années dans les sites de décharge. Les nouvelles données de Yang et al. [2015a & 2015b] suggèrent cependant une solution possible. Les vers de farine — la forme larvaire du *Tenebrio molitor* ou ténébrion meunier — consomment le polystyrène expansé quand un meilleur repas n'est pas disponible et il transforment 48 % de ce qu'ils mangent en dioxyde de carbone.

Avec seulement le PS comme nourriture les vers ont vécu tout aussi bien que ceux qui recevaient un régime normal de son de blé, pour une période d'un mois. L'analyse des excréments des vers, qui se nourrissaient avec la mousse de PS, a confirmé que le clivage et/ou la dépolymérisation des molécules à chaîne longue a lieu dans le tube digestif des larves [Yang et al. 2015a].

On a isolé une souche de bactéries du tube digestif des vers de farine qui, en 28 jours d'incubation, pouvait constituer un biofilm sur le film de PS. Et en outre, des petits puits et des cavités devenaient perceptibles sur le film PS en même temps qu'une réduction de l'hydrophobicité et une formation de groupes polaires C-O. Le poids moléculaire du PS restant était plus faible après incubation avec des bactéries et la libération de produits filles, solubles dans l'eau, a été démontrée. Ces résultats nous montrent que les bactéries du tube digestif jouent un rôle essentiel dans la biodégradation et la minéralisation du PS; ils confirment également la présence de ces bactéries dans les ténébrions [Yang et al., 2015b].

Le polytéréphtalate d'éthylène a également un grand nombre d'applications aussi bien pour l'industrie que pour le consommateur ordinaire. Le polytéréphtalate d'éthylène (PET) est largement utilisé; surtout pour les bouteilles et autres récipients alimentaires. Ceci comprend les boissons gazeuses, les produits de boulangerie, le beurre d'arachide et même les denrées

congelées. Comme il est facile à mouler on l'utilise couramment pour les produits cosmétiques. Les producteurs peuvent créer des formes très spécifiques pour une grande variété de produits cosmétiques. Et le PET est également largement utilisé pour les produits chimiques, même les produits de nettoyage dont nous avons tous besoin.

Mais l'accumulation du PET dans l'environnement est devenue un problème mondial. Par le dépistage des populations naturelles de bactéries exposées au PET dans l'environnement, Yoshida et al. [2016] ont réussi à isoler une nouvelle bactérie, *Ideonella sakaiensis*, capable d'utiliser le PET comme source principale d'énergie et de carbone. Une population d'*Ideonella sakaiensis* peut décomposer en à peine six semaines un mince film en PET à une température de 29 C.

Cultivées sur le PET, ces bactéries produisent deux enzymes capables d'hydrolyser le PET et son produit intermédiaire de réaction, le mono (2-hydroxyéthyl) acide téréphtalique. Les deux enzymes sont nécessaires pour transformer le PET de manière efficace en acide téréphtalique et en éthylène glycol, deux monomères respectueux de l'environnement.

Avons-nous maintenant une solution pour la pollution plastique mondiale? Il est clair que nous avons besoin de plus de temps pour améliorer nos connaissances. Des études antérieures ont montré que des champignons peuvent se développer sur le plastique. Maintenant les microbes, qui mangent le plastique, ont été découverts. Les experts s'attendent donc à des souches bactériennes qui pourraient bien être la réponse à la masse toujours croissante de plastique, qui finit dans l'environnement et détruit notre planète.

À ce stade, nous ne pouvons que prendre du recul, croiser les doigts et espérer que les bactéries vont pouvoir nettoyer notre monde!

Références

Jones et al. [1974]. Biodegradability of photodegraded polymers. I. Development of experimental procedures, *Environmental Science and Technology* 10, 919 – 923

UNEP [2006]. Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas

Yang et al. [2014]. Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic-Eating Waxworms, *Environmental Science and Technology* 48, 13776 – 13784

Yang et al. [2015a]. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests, *Environmental Science and Technology* 49, 12080 – 12086

Yang et al. [2015b]. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms, *Environmental Science and Technology* 49, 12087 – 12093

Yoshida et al. [2016]. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate), *Science* 351, 6278, 1196 – 1199