

## PŘÍLOHA 2

### Klíčové procesy pyrolýzy odpadních plastů a elastomerů

V následujícím textu jsou popsány a dokumentovány významné procesy pyrolýzy odpadních plastů a elastomerů, které se ve světě již průmyslově využívají nebo jsou ve fázi pokročilého vývoje a mají potenciál pro budoucí využití i v podmínkách ČR.

#### 1 GB PYROLYSIS

Technologie nízkoteplotní katalytické depolymerizace je jednou z oblastí, kterou se zabývá společnost GB Energy. Jedná se o technologii zpracovávající plastové odpady, pneumatiky, odpadní oleje a tříděný komunální odpad. Díky přítomnosti patentovaného katalyzátoru je reakční teplota oproti jiným technologiím relativně nízká, pohybuje se v rozmezí 275 - 445°C. Produkty jsou klasicky syntetický olej, plyn a uhlíkatý pevný zbytek, firmou nazývány Poly-fuel, Poly-gas, Poly-carbon. Po světě již bylo instalováno zhruba 45 zařízení, převážně v Indii. [1].

Vstupní materiál	Vstupní množství	Přibližné výstupní množství
Směs odpadů ze smíšeného plastu	1000 kg	700-900 l oleje 50-100 kg plynu 30-50 kg uhlíkatý zbytek
Odpad z nylonových pneumatik	1000 kg	450-600 l oleje 100-120 kg plynu 250-350 kg uhlíkatý zbytek
Odpad z radiálních pneumatik	1000 kg	400-550 oleje 100-120 kg plynu 200-300 kg uhlíkatý zbytek 80-100 kg úlomky ocelového drátu
Odpad motorových a průmyslových olejů	1000 kg	900-1000 l oleje

Tabulka 1: Výtěžek produktů pyrolýzou GB Pyrolysis [1]

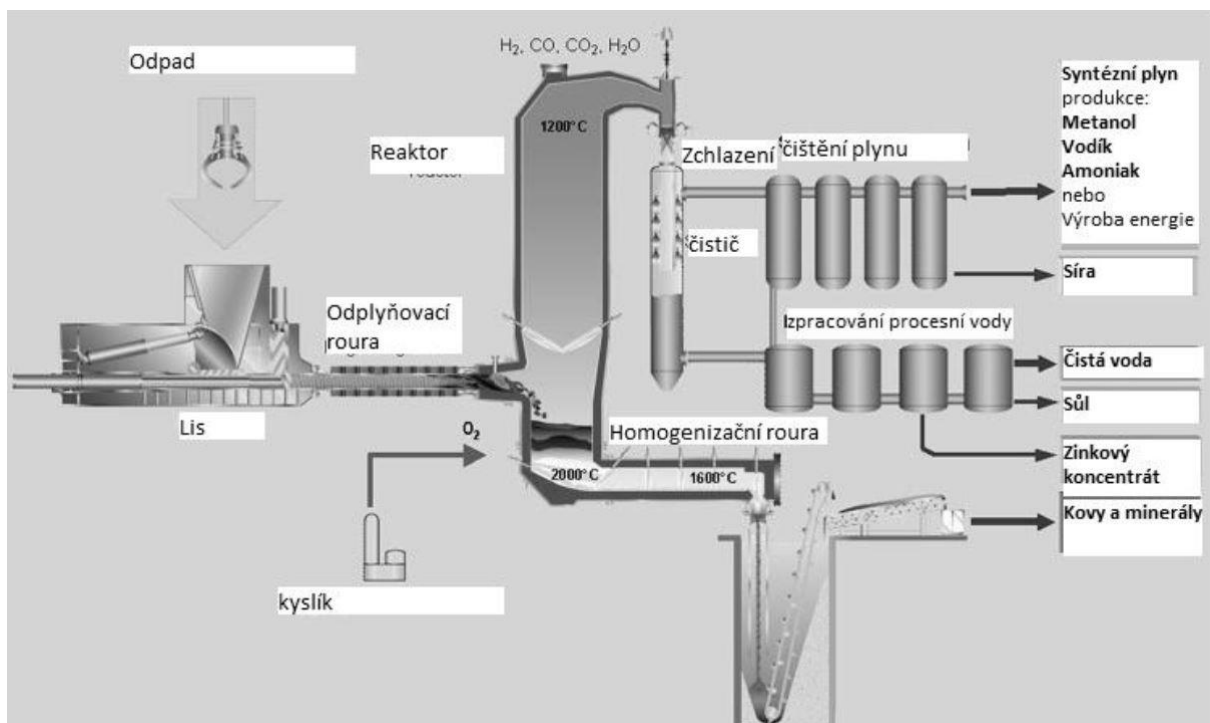
#### 2 THERMOSELECT

Tato technologie se zabývá likvidací a zpracováním tuhého komunálního odpadu již od roku 1990. Produkty procesu jsou zejména syntézní plyn, sklu podobné materiály, kovy bohaté na železo a síra. Princip procesu je trochu jiný, než u předchozích technologií, protože jde o kombinaci pyrolýzy a zplyňování. Během první fáze je materiál stlačen a nalisován do kostek, které jsou vpraveny do odplynovací roury. V té za nepřítomnosti vzduchu a za zvyšujícího tlaku a teploty dochází k odplynění a karbonizaci organické složky materiálu. Anorganické materiály obsažené v odpadech prochází touto fází bez větších změn. Následně je pak tato směs vpravena

do vysokoteplotního reaktoru. Zde je přidáváno kontrolované množství kyslíku a za teplot okolo 2000°C a v prostředí bohatém na vodní páry je tuhý uhlíkatý zbytek zplyňován. Kovové a minerální zbytky jsou roztaveny a dále využity k recyklaci. Syntetický plyn je následně prudce zchlazen na teplotu okolo 90°C a prochází několika stupňovou čistící fází, kde dochází k absorpci nebo kondenzaci kontaminantů. Anorganické materiály, roztavené v reaktoru, jsou homogenizovány v homogenizační trubce napojené na reaktor. Následně jsou zchlazeny vodou do podoby granulátu, který je nakonec magneticky roztříděn a připraven k recyklaci [2].



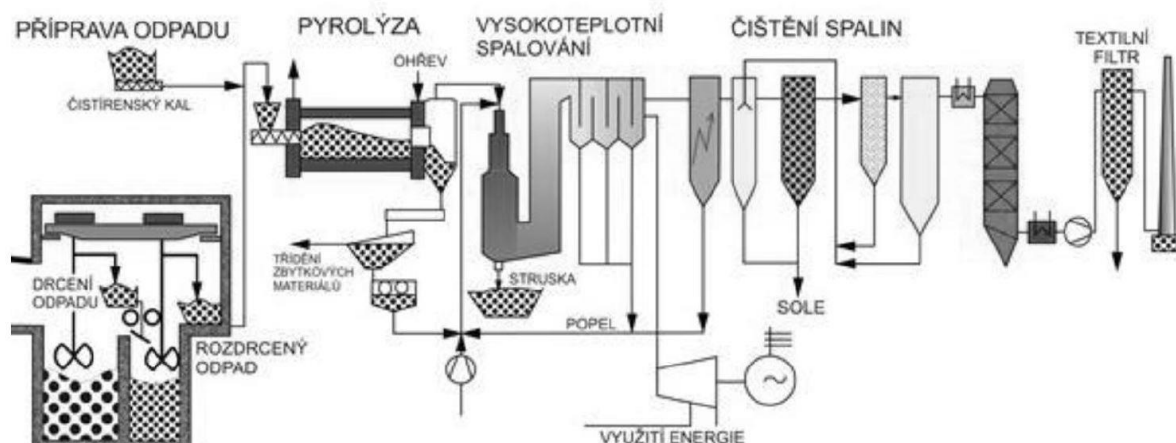
Obrázek 1: Provozované jednotky v Japonsku



Obrázek 2: Princip technologie Thermoselect [2]

### 3 TECHNOLOGIE S-B-V (SCHWEL-BRENN-VERFAHREN)

Tato technologie byla realizována již v roce 1988 díky patentu společnosti Siemens-KWU. Pilotní jednotka se nacházela v Ulm-Wiblingenu a o deset let později byla zprovozněna další, tentokrát již provozní jednotka, ve Fürthu. Toto provozní zařízení je schopno zpracovat 100 000 tun drceného odpadu a čistírenských kalů za rok. Tento odpad se kontinuálně přivádí do rotační pyrolýzní komory, kde je zahříván na teplotu 450°C. Jedná se tedy o proces pomalé pyrolýzy. Z tuhého zbytku se poté vytrídí hrubá frakce, tvořená převážně sklem, kamením a kovy. Vyčištěný pevný zbytek a pyrolýzní plyn jsou vedeny do spalovacího prostoru, kde za teplot 1200-1300°C probíhá téměř dokonalé spalování. Při procesu vznikající struska je chlazena ve vodní granulační lázni a poté může být využita ve stavebnictví nebo deponována na skládkách. Spaliny se dále po odprášení odsiřují, denitrifikují a dále čistí. Podle firmy Siemens je možné takto z jedné tuny tuhého komunálního odpadu získat až 1470 kWh užitečného tepla [20].



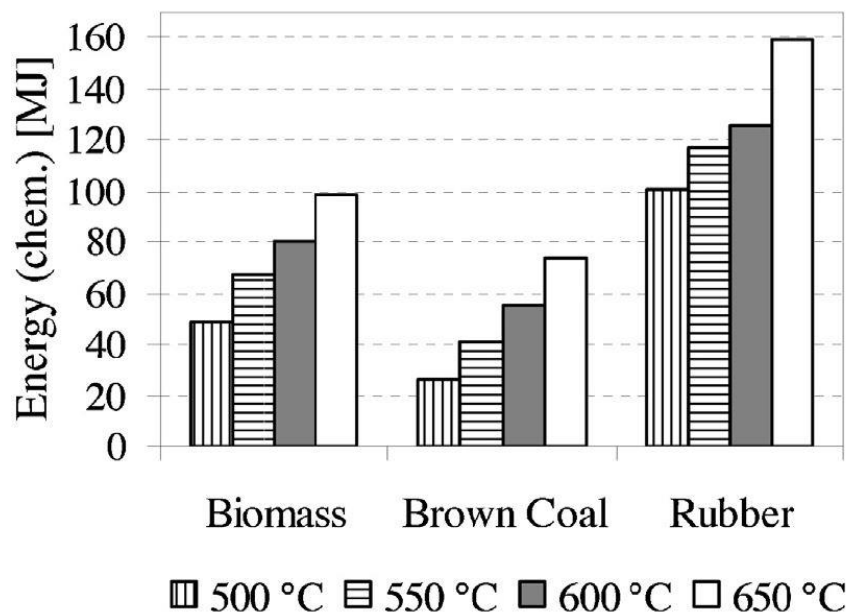
Obrázek 3: Schéma jednotky S-B-V

### 4 PYROMATIC

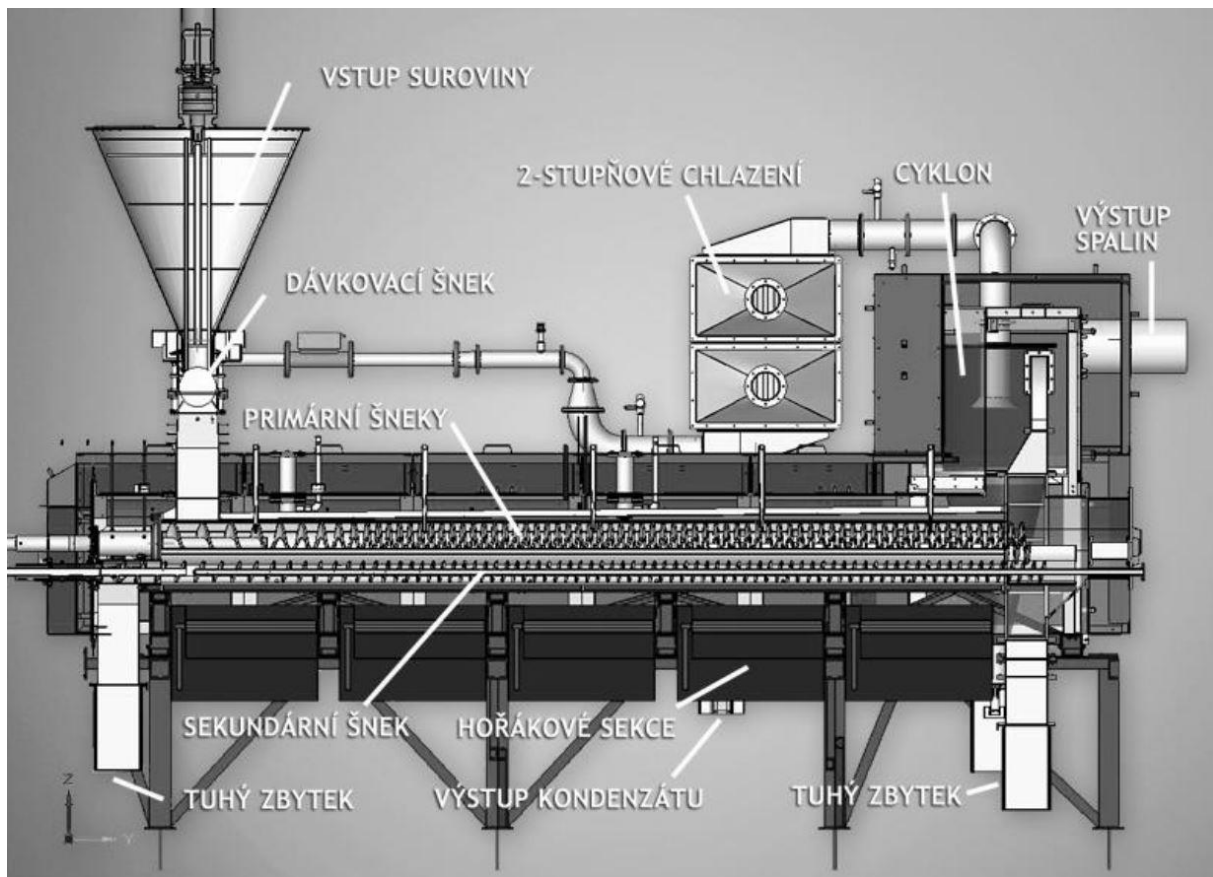
V České republice stojí jistě za zmínku technologie, na jejímž vývoji a výrobě spolupracuje VŠB - TU Ostrava spolu s firmou Klastř Envicrack, s názvem Pyromatic. Jedná se o jednotku využívající šnekový reaktor s kapacitou 50 – 200 kg/hod. Zpracovávaným odpadem jsou zejména pneumatiky a plasty, ale i jiné [4].

Mechanicky upravený materiál se nejdříve naváží na požadovanou hmotnost a je nadávkován pásovým dopravníkem do vzduchotěsného zásobníku, ze kterého je dále pomocí zásobníkové stěrky a šnekového dopravníku dávkován do pyrolýzní pece. Posun materiálu v peci je zajištěn třemi bezjádrovými šneky. Regulací otáček může být nastavována doba zdržení odpadu v aktivní zóně retorty (pohybuje se od 20 do 80 minut). Ohřev probíhá pomocí pěti sekcí propanových hořáků, které umožní dosažení provozní teploty až 800°C. Pevný uhlíkatý

zbytek je jímán do popelového boxu a plyny jdou do cyklonových odlučovačů. Takto vyčištěný plyn projde dvěma stupni chlazení. Primární tvoří dva křížové chladiče typu pyrolýzní plyn - vzduch, sekundární pak výměník pyrolýzní plyn - voda, kde je plyn podchlazován tak, aby v potrubí už dále nekondenzoval. Kondenzát se shromažďuje v nádrži s míchadlem a ochlazený plyn je veden přes odběrovou sondu a průtokoměr do zásobníku. Dále je využíván například v kogenerační jednotce. Na obrázku (10) je vidět celková chemická energie pyrolýzního plynu vyprodukovaného za 30 minut procesu z různých materiálů při teplotách od 500°C do 650°C. Je vidět, že množství energie roste s teplotou a dosahuje největších hodnot pro gumové odpady [5, 6].



Obrázek 4: Energetický výtěžek při různých teplotách z různých druhů vsázky [5]



Obrázek 5: Schéma jednotky Pyromatic [7]

## 5 BIOGREEN® & ETIA

Společnost ETIA, založená v roce 1989, je francouzská strojírenská společnost specializující se na ekotechnologie. Napříč celým světem existuje více než 150 jednotek, které zpracovávají různé suroviny. Jimi navrhovanou technologií lze zpracovávat jakýkoli sypký organický materiál na bázi uhlíku (biomasa, plasty či různé průmyslové odpady) [25].

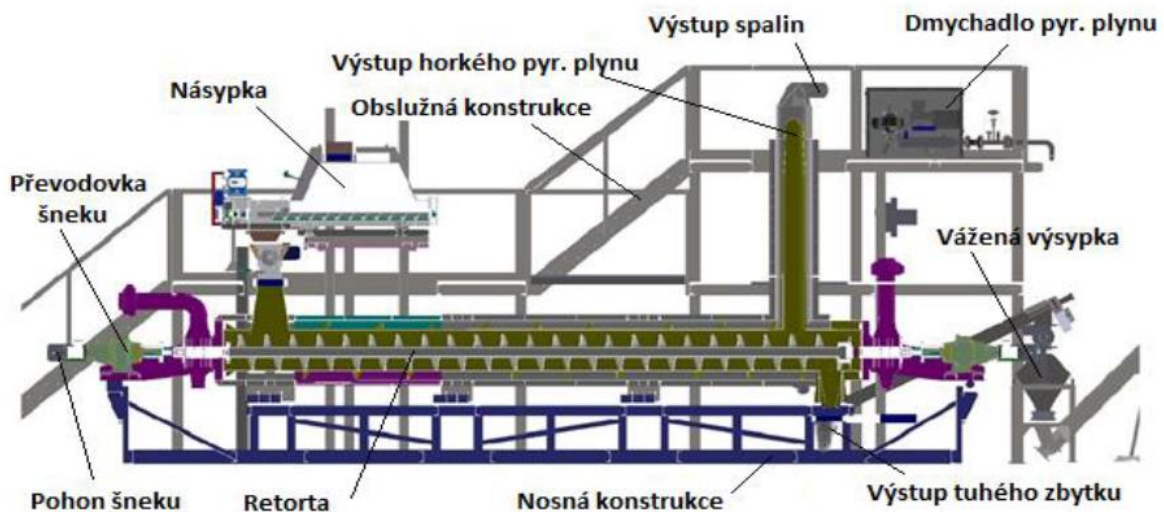
To je umožněno díky patentovanému, elektricky vyhřívanému šneku „Spirajoule®“, který lze provozovat v různém rozsahu procesních teplot (350 – 850°C). Jeho druhou funkcí je současně i doprava suroviny reaktorem. Tento fakt pak, dle společnosti, umožňuje provádět procesy od torefikace, karbonizaci až po vysokoteplotní pyrolýzu a získat tak produkty, které odpovídají požadavkům uživatele [8].

## 6 PYROTRONIC A PYROMATIC

Spolupráce společnosti Arrow line a.s., Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava a Klastru Envicrack vedla v roce 2005 k vývoji první generace poloprovozní jednotky na pyrolytické zpracování odpadů. První generace jednotky nesla název Pyrotronic a dokázala zpracovat 5 kg suroviny za hodinu. V rotující retortě, která byla vyhřívána pomocí elektrického topného tělesa o celkovém výkonu 6 kW, docházelo k pyrolytickému rozkladu suroviny.

Druhou generací jednotky, která v letech 2008 – 2009 vzešla ze stejné spolupráce, byla jednotka Pyromatic 50. Oproti předešlé generaci měl tento typ jednotky navýšenou kapacitu zpracovávané suroviny až na 50 kg za hodinu. Pyrolytický rozklad bylo možné provádět v rozmezí procesních teplot 500 – 800 °C. Teplo bylo dodáváno pomocí sady pěti hořáků na zemní plyn, jejichž celkový výkon byl 200 kW.

Třetí generace jednotky byla v letech 2011 – 2012 představena jako Pyromatic 250. Z původní tříčlenné spolupráce se na vývoji této jednotky podílela pouze Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a nově společnost LTS a.s. Tepelný rozklad probíhá taktéž v retortě, která je složena ze žáruvzdorné vyzdívky a pohyblivého šneku. Teplotní rozsah, při kterém lze jednotku provozovat, je stejný jako u předchozí generace, a to 500 – 800 °C. Výkon dvou plynových hořáků je pak navýšen na 640 kW. Další změna nastává i v případě množství zpracovávané suroviny, které je u třetí generace pětikrát vyšší a dovoluje tak zpracovávat 250 kg suroviny hodinově [9].



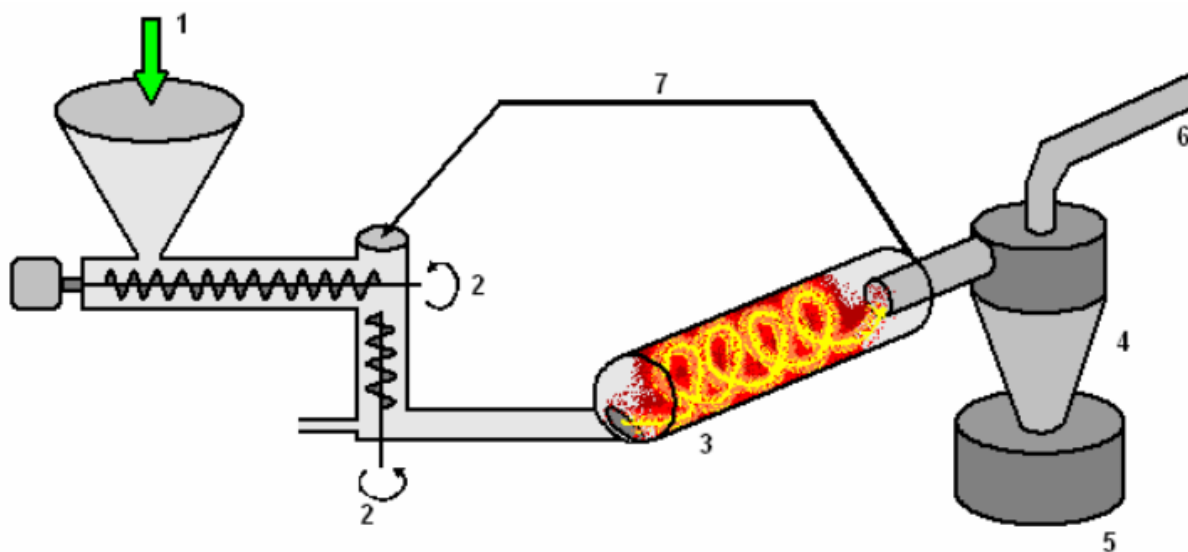
Obrázek 6: Technologické schéma jednotky Pyromatic 250 [9]

## 7 VORTEX – SOLAR ENERGY RESEARCH INSTITUTE

Tento typ pyrolyzního reaktoru dovoluje zpracovávat tuhé organické látky a biomasu. Takovýto druh suroviny pak umožňuje konvertovat především na kapalné produkty. Část technologického schématu, které bylo vyvinuto SERI (Solar Energy Research Institute) v Coloradu (USA), je uvedeno na obrázku 7 [10].

Zpracovávaná surovina je tangenciálně vedena do reakčního prostoru, kde dochází ke styku s horkými stěnami reaktoru. Díky vysoké rychlosti (přes 350 m·s<sup>-1</sup>) dochází k rychlé pyrolýze za teploty stěny 625 °C. Zatímco postup tuhých částic reaktorem je zpomalován intenzivním třením o jeho stěny, vznikající pyrolyzní plyn odchází středem zařízení s velmi krátkou dobou zdržení. Jednotka byla testována na měkkém suchém dřevu a na měkkých předdrcených peletách RDF (Refuse Derived Fuel). Převedení zařízení do provozního měřítko však dosud naráží na problémy spojené se zanášením reaktoru částicemi s vysokou hustotou

a s vysokou abrazí způsobenou tvrdými anorganickými komponentami, které jsou přítomné zejména v RDF [10].



Obrázek 7: Schéma pyrolýzní jednotky Vortex – SERI: 1 – vstup suroviny, 2 – šnekový podavač, 3 – reaktor s tangenciálním vstupem, 4 – cyklon, 5 – kolektor tuhého zbytku, 6 – odtah pyroplynu, 7 – recykl prachových částic [10]

## 8 POLYPETRON

Společnost Sepco Industries se ve spolupráci s univerzitou Chulalongkorn aktivně od 90. let minulého století zapojuje do výzkumu a vývoje pyrolýzních technologií, kterými lze zpracovávat odpadní plasty. V roce 2003 společně navrhli první generaci pyrolýzní technologie Polypetron. Současný model páté generace technologie Polypetron je kontinuálně pracující zařízení, jehož součástí jsou dva šnekové reaktory. Systém je dle výrobce schopen 24 hodinového provozu 330 dní v roce (nutná údržba technologie je v rozmezí 30 – 35 dnů). Technologie dovoluje zpracovávat odpadní plast v množství 20 tun za den a produkovat tak pyrolýzní olej v množství až 17 000 l. Vedle pyrolýzního oleje vznikají také necelé 2 tuny plynných produktů a téměř 3 tuny pevného podílu. Poslední generace reaktorů technologie Polypetron vyžadují pro provozování 1,75 MW tepelné energie za hodinu. Jako paliva, která slouží pro dodání potřebné tepelné energie, jsou využívány vznikající produkty. Ztráty pyrolýzního oleje nejsou v tomto smyslu vyšší než 1 000 l. Alternativně lze použít jakékoli jiné palivo, jako například dřevěné pelety, uhlí, plyn atd.

Touto technologií lze zpracovávat jakýkoli typ plastu kromě polyvinylchloridu. Polyethylentereftalát není výrobcem taktéž doporučen kvůli nízkým výtěžkům pyrolýzního oleje. Zároveň by velikost jednotlivých částic neměla přesáhnout 8 cm [11].

## 9 TECHNOLOGIE TAC

Společnost Plastic energy se zaměřuje na chemickou recyklaci obalových plastových materiálů, plastových fólií, vícevrstvých obalových materiálů ale také odpadních plastů z automobilového průmyslu. Před vlastním zpracováním odpadního materiálu je nutné odstranit nežádoucí materiál podle specifikace procesu, tj. omezit kontaminaci vstupní suroviny na 10 % látkami, kterými mohou být různé jiné materiály, „necílené“ polymery jako PET, PVC, EPS, inkousty a jiné. Jako vstupní materiál se používá především směs polymerů (PE, PP a PS).

Za vývoj technologie TAC, což je zkratka pro Thermal Anaerobic Conversion, stojí společnost z Velké Británie Plastic Energy. Tato patentovaná technologie dovoluje zpracovávat odpadní plasty na takzvaný „TACOIL“, který je firmou označován jako optimální zdroj pro výrobu nových plastů. V současné době firma Plastic Energy vlastní a provozuje ve Španělsku (Almería a Sevilla) dvě technologie na chemickou recyklaci odpadních plastů, které jsou v provozu od roku 2016 a 2017 [12].

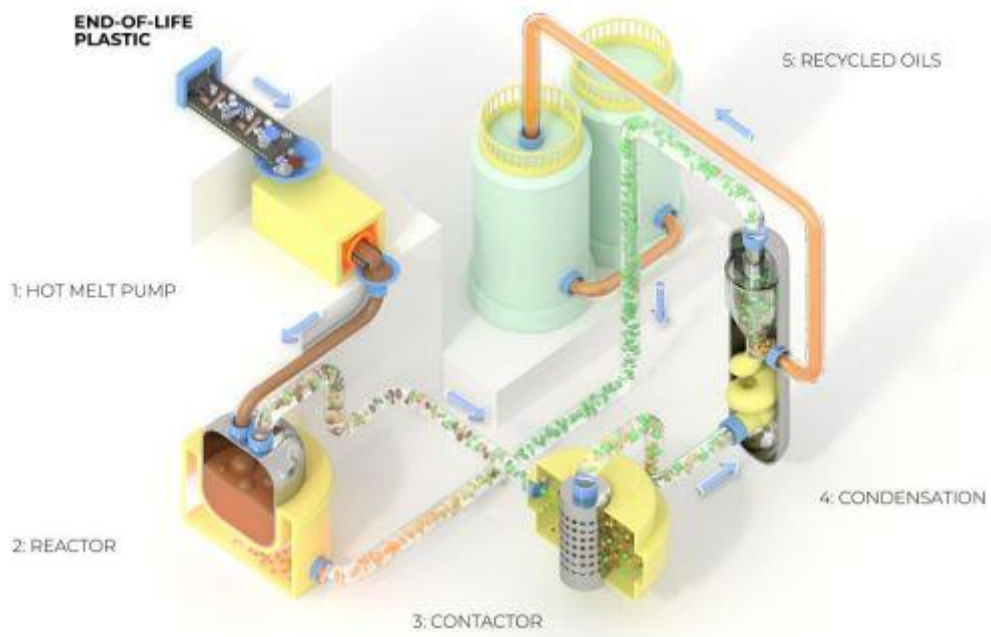
Technologie TAC dokáže běžně zpracovávat plasty jako je polyethylen, polypropylen či polystyren. Surovina je zahřívána bez přístupu kyslíku, přičemž dochází ke štěpení molekul. Produkty jsou následně ochlazeny a zkondenzovány. Pevný podíl je po separaci spalován a vzniklé teplo je použito pro otop systému.

Výtěžky jsou přibližně 72-75 % pyrolýzního oleje, který nachází využití v petrochemickém průmyslu. Přibližně 18 % syntézního plynu je využito k pohonu elektrárny a snižuje tím spotřebu dodávané „vnější“ energie. Přibližně 8-10 % pevného produktu nachází využití v konstrukčních materiálech (cihly, cement apod.) a při výrobě energie.

Pyrolýzní technologie společnosti Plastic energy se opírá o následující pilíře:

- Je robustní a nekomplikovaná
- Využívá polodávkovacího procesu
- Není potřeba přidávat žádné další látky (např. katalyzátory)
- Rovnoměrné a stabilní vytápění, které je nezbytné pro řízení procesu a konzistentní produkt
- Relativně mírná teplota a nízký tlak
- Procesní řešení pro využití tepla a rekuperaci energie

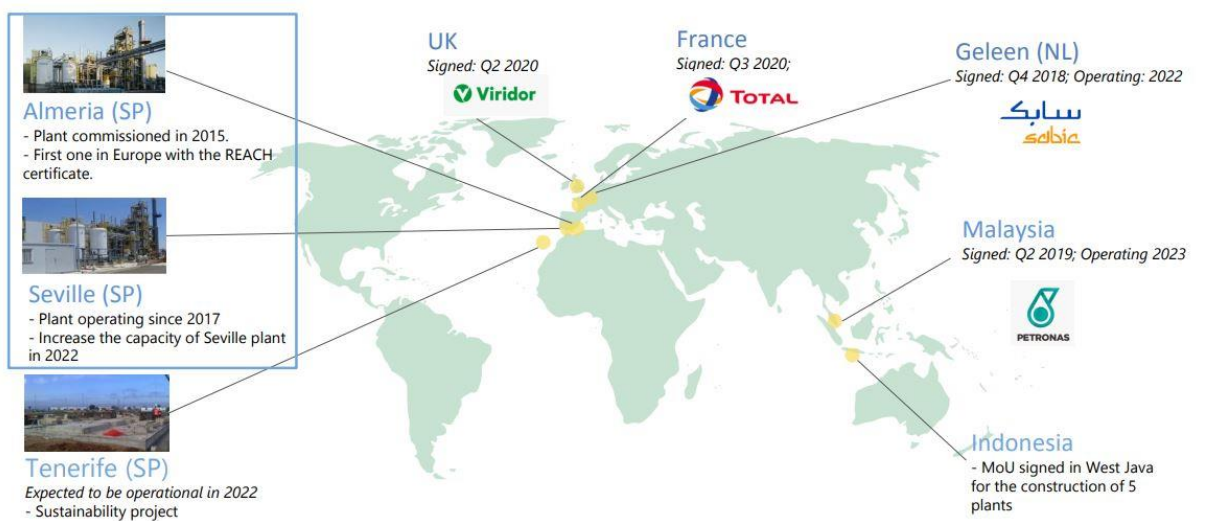




Obrázek 8: Schéma technologie pyrolýzy odpadních plastů společnosti Plastic energy [12]



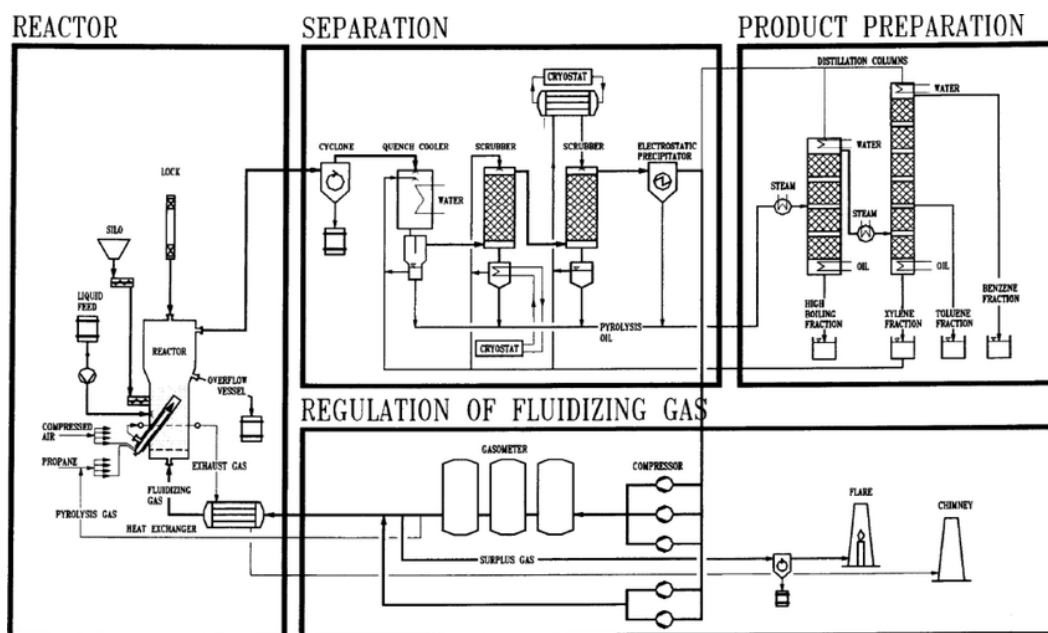
Obrázek 9: Technologie pyrolýzy odpadních plastů společnosti Plastic energy, Španělsko [12]



Obrázek 1: Partneři společnosti Plastic energy [12]

## 10 HAMBURG UNIVERSITY

Na institutu anorganické a použité chemie university Hamburg byl testován pro pyrolýzu plastů pyrolýzní reaktor s fluidním ložem SiO<sub>2</sub> při teplotě mezi 650 až 850 °C. Jako fluidní plyn sloužil na 450 °C přehřátý pyrolýzní plyn. Jako dávkovací systém drcených plastů byla zvolena kombinace dávkovacího podavače a vodou chlazeného šneku. Reaktor sestával ze tří prstenců o průměru 500 mm. V prostředním prstenci byl napojen na přírubě dávkovací systém. Vespod a nahoře dávkovacího šneku byly umístěny dva sálavé hořáky. Vyroběný pyrolýzní plyn spolu s fluidním plynem se čistil v cyklonu a následně byl ochlazen na 30 až 80 °C. Kondenzát se shromažďoval ve frakční nádobě. Plyn je propírán pyrolýzním olejem přičemž zkondenzované uhlovodíky se rozpouštějí v pyrolýzním oleji. Pyrolýzní plyn byl stlačován membránovým kompresorem na 2 až 3 bar a skladován v tlakovém zásobníku. Odtud byl fluidní plyn pro reaktor a topný plyn pro hořák odčerpáván. Přebytečný plyn byl spalován na fakuli. Jako produkty podle výchozího materiálu vznikaly 40 až 60% pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn s obsahem metanu, etanu, etylenu a propenu a až 20% vodíku. Výhřevnost plynu se pohybovala okolo 45 MJ/m<sup>3</sup>, což je vyšší výhřevnost, než má zemní plyn [13].



Obrázek 11: Schéma pyrolýzní jednotky [13]

## 11 MVU ROTOPYR, NĚMECKO

Proces MVU – ROTOPYR měl v úmyslu zajistit produkty uplatňující se na trhu. MVU spolupracovala s Eisen - metall, která se zabývala recyklací neželezných kovů a firmou Rutgerswerke, která je největším producentem dehtu v Německu. Zajišťovala jakostní management pyrolýzního oleje. Jako vstupní suroviny byly použity pneumatiky, plasty, ale

i staré kabely, drcené odpady, kyselinové pryskyřice z regenerace olejů. Všechny tyto vstupní materiály mají vysoký organický podíl. Vývoj této pyrolýzy byl podporovaný i

ministerstvem pro výzkum a technologie. Pokusná jednotka měla hodinovou kapacitu 200 kg. Vstupní materiál byl do rotačního bubnu dávkován podávacím šnekem. Tuhé zbytky pyrolýzy jako jsou kovy, uhelný zbytek padaly na konci bubnu do vodního uzávěru. Výstupní plyn byl vedený do rotační pračky, kde byl ochlazený na 50 °C. Saze a uhlovodíky klesly na dno pračky. Další uhlovodíky zkondenzovaly po zchlazení na atmosférickou teplotu. Vodní a alkalická pračka se využívá k zachycení kyselých frakcí ze surového oleje. Plyn byl dále propírán pyrolýzním olejem, kde se zachytí benzen a jeho homology. Vyčištěný plyn byl použit k ohřívání rotačního bubnu. Dekantér byl využit k oddělení oleje a vody. Olej z praček byl destilován. Jako ideální doba zdržení se ukázala 45 minut při teplotě 650 °C. Austenická ocel byla použita na výrobu reaktoru a sklo na nízkoteplotní část pyrolýzního zařízení. Pyrolýza pneumatik měla přes 80 % koksu a dehet byl oproti dehtu v plastech také mnohem vyšší u pneumatik. Obsah chloru se ve všech testovaných surovinách pohyboval od 1 do 2

%. Pilotní projekt této pyrolýzy nebyl nikdy realizován v průmyslovém měřítku z důvodů materiálové nevyužitelnosti produktů pyrolýzy [14, 15, 16].

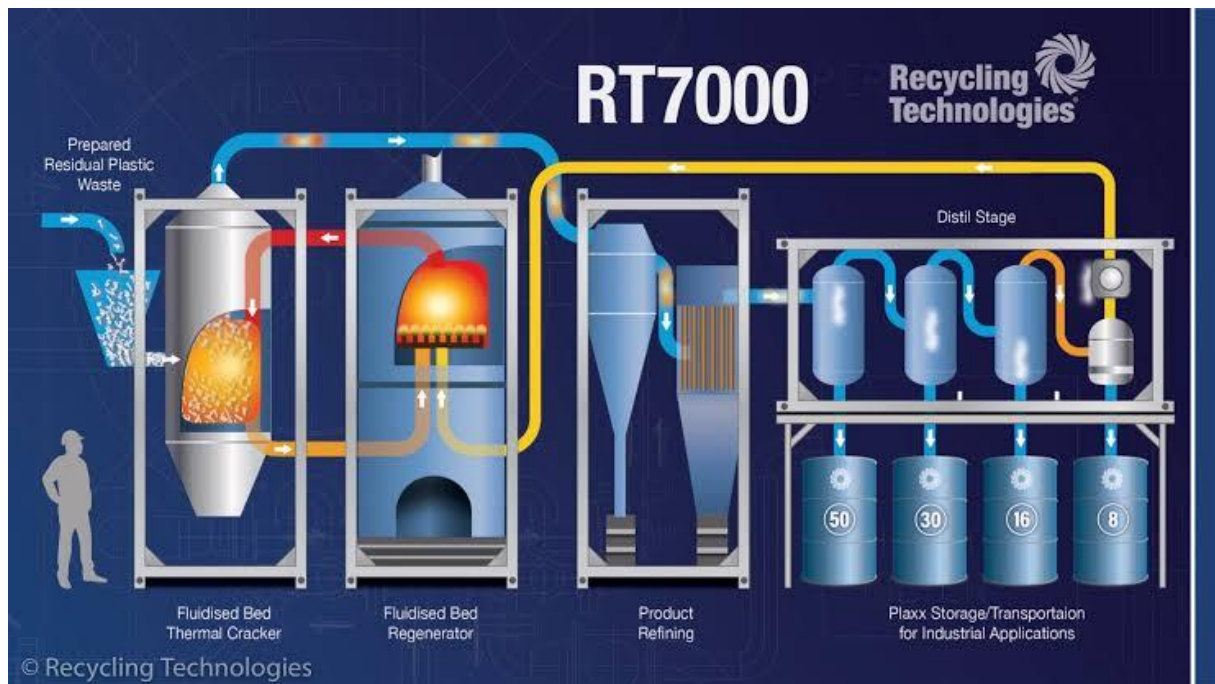
## **12 RECYCLING TECHNOLOGIES 7000 (PLAXX)**

Společnost Recycling technologies (RT) se nachází v jihozápadní Anglii v městě Swindon. Této společnosti se podařilo vytvořit pyrolýzní jednotku s názvem RT7000, která zpracovává různé typy odpadních plastů. Používaný proces je podobný tepelnému krakování.

Plast je nejdříve očištěn od cizích předmětů (různé nečistoty, zbytky jídla apod.) a poté se zahřeje na 500 °C pomocí žhavých pískových částic. Tím jsou zpřetrhány uhlíkové vazby v plastovém materiálu. Různé druhy plastů mají různé body varu, což umožňuje vyrábět různé produkty. Jednotka RT7000 vyrábí tři druhy pyrolýzních olejů. Zjednodušeně řečeno, přeměna ropy na plasty je založena na vytváření dlouhých uhlovodíkových řetězců a procesem pyrolýzy jsou tyto dlouhé řetězce zkracovány. Vyrobený olej se označuje “Plaxx”. Jednotka vyrobí ze 7000 tun suroviny cca 5000 tun oleje “Plaxx”, což je zhruba roční kapacita jednotky.

Mezi vyráběné oleje “Plaxx” patří lehký olej vhodný pro petrochemické zpracování, dále olej vhodný pro spalování v lodních motorech a nakonec “tmavý” hustý olej, který nachází uplatnění v kosmetice.

Jednotka RT7000 má rozměry cca 10 m x 25 m. Z přepravního hlediska je jednotka velmi skladná a vejde se do pěti lodních kontejnerů. Instalace stojí cca 3,8 milionu dolarů a provoz cca 650 000 dolarů ročně. Společnost Recycling technologies tvrdí, že jednotka generuje příjmy ve výši cca 2,2 milionu dolarů ročně, což naznačuje, že se investice spojená s koupí jednotky vrátí do tří let.



Obrázek 22: Schéma jednotky RT7000 [17]



Obrázek 33: Jednotka RT7000 ve Swindonu [17]

### **13 BASF - CHEMCYCLING™**

I společnost BASF si uvědomuje výhodu chemické recyklace odpadních plastů a proto inovuje a podporuje recyklaci odpadních plastů. Klíčovým pilířem je jejich projekt ChemCycling™. V tomto projektu chemické recyklace spolupracuje společnost BASF s partnery na vývoji technologie pyrolýzy, která přeměňuje plastový odpad na druhotnou surovinu – pyrolýzní olej. Produkty vyrobené chemickou recyklací jsou nezávisle certifikovány a mají stejné vlastnosti jako produkty vyrobené z fosilních surovin. Projekt ChemCycling™ se zaměřuje na plastový odpad, který není z technologických, ekonomických nebo ekologických důvodů mechanicky recyklován. Příkladem jsou plasty se zbytky, směsné plastové odpadní frakce, skládající se z různých druhů plastů, které nebudou dále tříděny, nebo použité pneumatiky, které se jinak nerecyklují. Mechanická a chemická recyklace mohou společně zvýšit celkovou míru recyklace a přispět k oběhovému hospodářství plastů [18].

### **14 SAPPORO PLASTIC RECYCLING VE SPOLUPRÁCI S KLEAN INDUSTRIES INC.**

Společnost Sapporo Plastic Recycling (SPR) provozuje od roku 2000 na ostrově v Hokkaidu v Japonsku komerční zařízení na zkapalňování plastů s kapacitou 50 tun směsného plastového odpadu denně. Tepelným rozkladem těchto odpadních plastů se vyrábí lehký olej, který se používá jako chemická surovina pro výrobu nových plastů. Dále je vyráběn ropný olej podobný naftě a také těžký olej, který se používá k výrobě elektřin.

SPR umožňuje chemicky recyklovat také PET a PVC a to do obsahu 20 % hmotn. v surovině. Jejich technologie má patentovaný proces dechlorace, který odstraňuje plynný chlorovodík produkovaný tepelným rozkladem PVC a využívá vodu k přeměně plynu na kyselinu chlorovodíkovou. V produktech tak zbyde maximálně 100 ppm chlóru. Technologie využívá speciální katalyzátor, který se přimíchává do plastového odpadu.

Klean Industries Inc. Je společnost zabývající se na recyklaci ropných odpadů. Společnost plánuje v Evropě a v Severní Americe vybudovat zařízení, která využívají stejnou technologii, kterou používá SPR. Společnost v současné době (2021) pokračovala v jednání s globálním chemickým konglomerátem o společném zřízení zařízení na obnovu zdrojů v řadě klíčových závodů v Severní Americe. Toto udržitelné řešení dodavatelského řetězce má poskytnout jednak elektřinu pro výrobní proces, palivo (naftu) pro flotilu nákladních vozidel a recyklovanou chemickou surovinu pro výrobu nových plastů, jakož i kompenzaci emisí oxidu uhličitého [29].

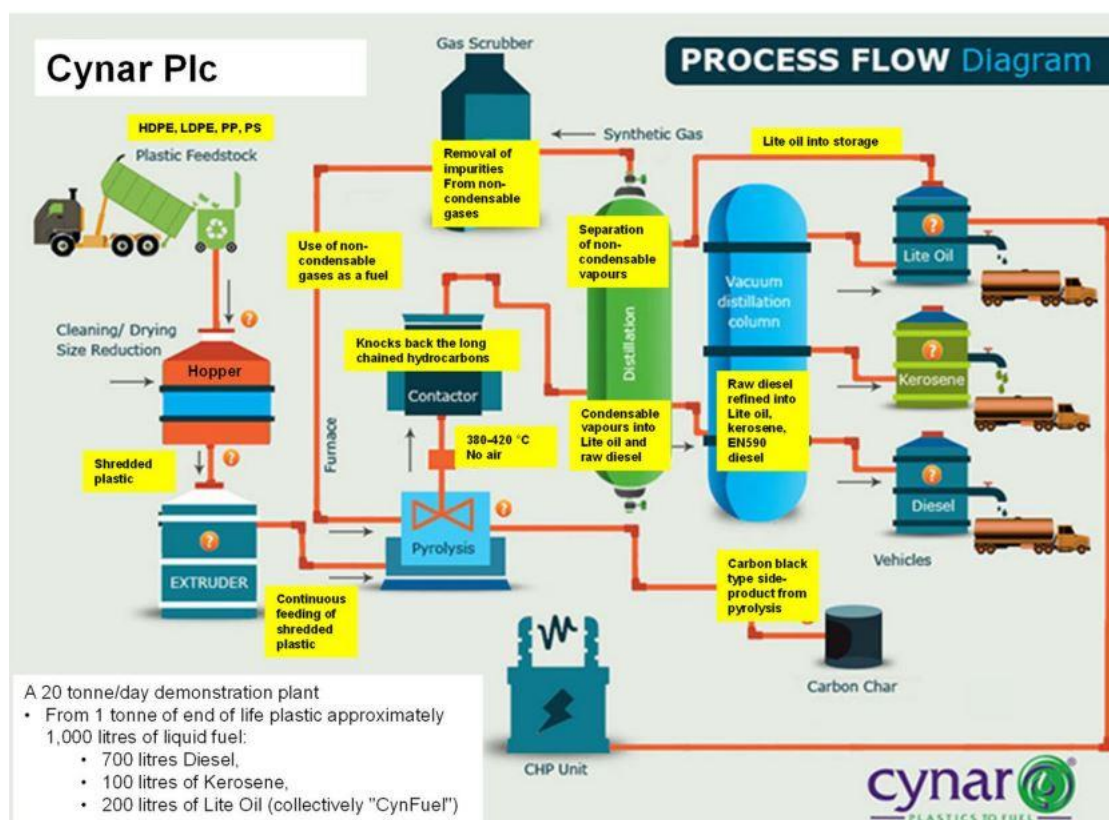
Výhody technologického zařízení [19]:

- Využití více než 90 % celkového plastového vstupu
- Zpracovává 15 000 tun směsného plastového odpadu za rok
- Výroba 4 MW elektřiny
- Výroba cca 8,75 mil. litrů oleje
- Výroba 4 MW tepelné energie pro dálkové vytápění
- Výroba 150 tun kyseliny chlorovodíkové ročně

- Cca 100 tun hliníku z plastových obalů ročně

## 15 CYNAR

Cynar je hlavním dodavatelem technologie PTL (Plastic to liquid) v Evropě. Technologie (Obrázek 15) byla již dodána také do Jižní Ameriky, na Floridu a do Karibiku. První závod společnosti Cynar byl postaven a provozován v irském Portlaoise v roce 2010. Další závody byly postaveny v Bristolu a v Londýně. Další továrna v komerčním měřítku byla uvedena do provozu ve španělské Almerii. Závod zpracovává směs spotřebního a průmyslového odpadního plastu k výrobě směsi středního destilátu motorové nafty splňující ASTM D975 a EN590 (CynDiesel™), lehký olej (CynLite™) a petrolej (CynKero™). Další komerční závod je v Seville, Španělsko [20, 21, 22].



Obrázek 14: Schéma technologie Cynar [23]

Plastový odpad je kontinuálně zpracováván ve válcové komoře a pyrolytické plyny kondenzují ve speciálně navrženém kondenzátorovém systému za vzniku převážně lineárních alifatických uhlovodíků s malou tvorbou vedlejších produktů. Tyto uhlovodíky jsou pak selektivně kondenzovány a dále katalyticky štěpeny za vzniku uhlíkového řetězce potřebného pro palivo. Plast je pyrolyzován při 370 °C až 420 °C a pyrolýzní plyny kondenzují ve dvoustupňovém kondenzátoru. Plastový odpad je veden přes podávací systém přímo do pyrolýzní komory. Mícháním se vyrovnává teplota a homogenizuje surovina. Poté co začne plast pyrolyzovat, tak se změní na páru. Pára se v destilační koloně rozdělí na různé frakce a destiláty pak přecházejí do regeneračních nádrží, ze kterých je produkt veden do odstředivky pro odstranění nečistot, jako je voda nebo uhlík. Vyčištěné destiláty jsou dále čerpány do zásobních nádrží [20, 21, 22].

## 16 NEW ENERGY

Maďarská společnost New Energy vyvíjí technologii na zpracování odpadních plastů a pneumatik již od roku 2011. Jejich technologie využívá dvou reaktorů s celkovou kapacitou 8000 tun převážně pneumatik.

Nadrcená surovina putuje nejdříve do dávkovacího zásobníku. Tento zásobník dělí surovinu mezi dva reaktory. V reaktorech je teplota cca 450 °C. Technologie nevyužívá katalyzátory. Pyrolýzním procesem jsou pryžové polymery štěpeny na menší uhlovodíky, které se odpařují. Tyto páry jsou vedeny potrubím z reaktoru do výměníku tepla a oddělují se plyn od kapaliny. Kapalina je dále rozdělena na těžší a lehčí frakci. V reaktoru ještě zůstává měkký práškový materiál, tzv. pyrolýzní saze. Tyto saze jsou v separátoru oddělovány od dalších zbylých znečišťujících látek, jako např. ocel. Saze jsou během separace aktivovány pomocí páry, čímž se zvětší jejich měrný povrch. Takto upravené saze mají vyšší přidanou hodnotu pro gumárenský a plastový průmysl. Otápění reaktoru je realizováno pomocí vyčištěného plynu z procesu [24].

Produkty:

- Plyn, který je následně odsířen
- Benzinová frakce (oddělená od oleje podle bodu vznícení)
- Olejová frakce (využití v rafinérii, výroba energie, atd.)

## 17 LG CHEM

Za účelem recyklace plastového odpadu a jeho rozdělením na užitečné suroviny pomocí superkritické vodní páry postaví společnost LG Chem do roku 2024 závod na recyklaci plastů s roční kapacitou 20 000 tun [25].

Technologie superkritické vodní páry využívá superkritickou vodu zahřátou nad 273 °C a tlak 220 barů. Proces superkritické pyrolýzy taví a změkčuje plastový odpad, což usnadňuje přehřáté tlakové vodě využít více energie, čímž rozštěpí dlouhé molekuly uhlovodíkových řetězců. Společnost LG Chem 18.1.2022 uvedla, že bude spolupracovat se společností Mura Technology na vybudování pyrolýzního závodu v Dangjinu (cca 80 km od Soulu) do roku 2024.

Pyrolýzní zařízení by mělo mít účinnost asi 80 %, tzn. že z 10 tun plastového odpadu vznikne 9 tun recyklovaného oleje. Po analýze účinnosti pilotního závodu se společnost LG Chem dále rozhodne, zda postaví další závody. V roce 2021 se společnost SK Innovation stala první jihokorejskou petrochemickou společností, která využívala pyrolýzní olej z odpadních plastů pro výrobu petrochemických produktů [25].

## 18 MURA TECHNOLOGY

Britský průkopník technologie recyklace plastů dokončil v lednu 2022 akciovou investici společnosti LG Chem, předního světového výrobce chemikálií. Investice posiluje plány společnosti Mura na rozvoj a nasazení pokročilých recyklačních kapacit v průmyslovém měřítku po celém světě. Kromě toho, že se společnost LG Chem stala akcionářem společnosti



Mura, zakoupila procesní licenci od společnosti KBR, výhradního globálního licenčního partnera společnosti Mura. Tato licence bude klíčovou hybnou silou pokračujícího mezinárodního zavádění inovativního recyklačního procesu Hydro PRT a LG Chem plánuje postavit zařízení na hydrotermální technologii, které bude zpracovávat až 20 000 tun odpadního plastu [26, 28].

Systém Hydro PRT využívá superkritickou páru k přeměně plastu zpět na oleje a chemikálie, ze kterých byly původně vyrobeny, což umožňuje jejich použití pro nové plastové produkty původní kvality.

Jakmile bude zařízení, které bude první v Jižní Koreji používat superkritickou vodu, funkční, LG Chem plánuje přezkoumat potenciál pro výstavbu dalších míst. To bude i nadále řídit globální dopad společnosti Mura po nedávném oznámení jejího prvního závodu HydroPRT se sídlem v USA poblíž Seattlu. V britském závodě Mura v Teesside, který bude uveden do provozu v roce 2022, probíhá výstavba.

## 19 DRON INDUSTRIES

Proces hloubkového termického štěpení – termická depolymerizace je využívána na ke zpracování použitých pneumatik. K termickému štěpení se využívá průtočný vyhřívaný reaktor, do kterého se drcené pneumatiky dávkuje kontinuálně. Velikost nadrcených částí je cca 15 – 25 cm. Na ohřev reaktoru se používá recyklovaný plyn přímo z procesu, který je spalován v plynových hořácích umístěných v peci. Proces probíhá v inertní atmosféře bez přítomnosti kyslíku. Proces termického štěpení probíhá při teplotách okolo 700 °C. Reaktor má dva výstupy. Jedním výstupem reaktor opouští pevné části (koks a ocelové dráty). Druhým výstupem z reaktoru proudí páry a plyny. Páry dále procházejí dvoustupňovým kondenzačním systémem, kde se kondenzují na olej [29].

Společnost Dron Industries procesem termického štěpení opotřebovaných pneumatik vyrábí čtyři produkty [46]:

- 1) DRON olej (DO) – Jedná se o kapalný uhlovodíkový podíl. Kapalné produkty se mohou použít jako paliva nebo jako petrochemická surovina. Spalné teplo je 40-43 MJ/kg
- 2) DRON Koks (DK) – Jedná se o pevný materiál – saze, koks, pyrouhlík. Spalné teplo je v tomto případě 28-30 MJ/kg. Využívá se v energetice jako tuhé palivo, Po valorizaci je možné využít zpět k výrobě pneumatik.
- 3) DRON Plyn (DP) – Plyn tvoří uhlovodíky C1 – C5 a vodík. Spalovací teplo plynu je 35-42 MJ/m<sup>3</sup> a díky tomu je využíván především na ohřev reaktoru.
- 4) DRON Ocelové kordy (DOK) – Tyto kordy mají lepší vlastnosti, než kordy získané z mechanické recyklace pneumatik. Mají vyšší sypanou hmotnost, dobře se lisují a neobsahují zbytku pneumatik.

## 20 RECENSO GMBH

Společnost Recenso vyvinula proces pro průmyslové použití, který převádí směsné plastové frakce na kapalnou a univerzálně použitelnou uhlovodíkovou směs. Proces CTC (Catalytic Tribochemical Conversion) má potenciál hrát důležitou roli v celé řadě aplikací po celém světě [31].

CTC je proces zkapalňování vysokomolekulárních látek, které vznikly z plastu nebo organických látek. CTC proces se vyznačuje kombinovanou aplikací termických katalytických a mechanochemických (tribochemických) mechanismů, při kterých se využívá třecí síla, jako zdroj energie. CTC proces pracuje za mírných podmínek: atmosférický tlak, teplota pod 400 °C. Materiál je kontinuálně přiváděn do horkého kapalného systému obohaceného katalyzátorem. Tribochemické reaktory promíchávají vzniklou kaši, která se zahřívá. Proces CTC zpracovává odpadní plasty ale také celulózu (obsah až 30 % ve směsi). Vzhledem k tomu, že se jedná o jednostupňový proces, kvalita produktu do značné míry závisí na složení vstupního materiálu. Vyrobený olej (označovaný jako Carbolic-CLR) je vhodný jako surovina pro petrochemický průmysl nebo také jako palivo. Katalytická tribochemická konverze (CTC) je charakterizována svou použitelností pro různé materiály (směsný plastový odpad, nebo odpadní biomasa). Vyrobený olej lze využít pro energetické účely, nebo jako druhotnou surovinu v petrochemickém průmyslu [31].

Jednotka má kapacitu 600-1000 kg/hod vstupního materiálu a vyrobí cca 350-500 kg/hod kapalného materiálu. Podle společnosti mohou být provozovány až 4 jednotky jedním týmem. Investice na instalaci 4 jednotek je cca 15 milionů euro, celková výrobní kapacita pak činní 10 tisíc tun za rok [31].

Společnost Recenso se svými partnery vytvořilo pilotní závod pro aplikaci procesu CTC. Konstrukce odpovídá mezinárodním standardům pro průmyslové aplikace a je využívána v Německu pro testování a další vývoj.



Obrázek 45: Recenso - Dieselwest (CTC proces) [32]

## 21 PYROLUN

Tato technologie je konstrukčně uzpůsobena pro termický rozklad polymerních odpadů jinak nerozložitelných v přírodních podmínkách. Reakci zajišťuje energeticky hodnotný kapalný produkt, tuhý zbytek polykarbon a plynnou složku. Z jedné tuny vstupního materiálu z polymerních odpadů lze získat 650-850 kg pyrolýzní kapaliny, která se poté dá přimísit do standardního diesellového paliva pro motory s vnitřním spalováním, například u nákladních aut, a to do 20 % objemu. Pyrolýzní kapalinu je možné využít i jako samostatné palivo pro vytápění [33]. Technologie Pyrolun je již vypracovaná na průmyslové úrovni. Reaktory jsou konstruované pro kontinuální provoz po celý rok s denní kapacitou 1-24 tun materiálu. Ve výrobním procesu se pracuje pouze s nízkým přetlakem a podtlakem, konstrukce je tedy bezpečná. Pyrolýzní jednotka využívá jako zdroj tepla spalování výstupních produktů, zařízení je tedy energeticky soběstačné. Výhodou inertního reakčního prostředí této technologie je omezena tvorba furanů a dioxinů [50]. Provoz zařízení je plně automatizovaný a jeho konstrukce odolává vysokým teplotám, mechanickému zatížení i fyzikálně – chemickým reakcím. Celá technologie je již patentována a vlastníka patentu na území Evropské unie zastupuje firma Nazar s.r.o. Společnost v současné době spolupracuje s technickou univerzitou Vysokou školou báňskou v Ostravě, kde je pilotní jednotka v provozu [33].

Jednotka zajišťuje efektivní rozklad různých druhů odpadů dle chemického složení, díky čemuž není vyžadováno důkladné třídění. Proces probíhá v hermeticky uzavřeném reaktoru v rozmezí teplot 500-600 °C, kdy neprobíhá výpar těžkých kovů. Vlivem uzavřeného cyklu není možný únik škodlivin do okolního prostředí. Odorometrická měření neprokázala v okruhu tří metrů kolem pyrolýzní jednotky žádný zápach. Ekologická čistota pevného produktu prokarbonu byla prověřena analýzou vodního výtoky z materiálu. Pevný vzorek byl z reaktoru odebrán po zchlazením na pokojovou teplotu. Odebrány byly vzorky kouřového plynu z hoření pyrolýzního plynného produktu za nedostatku a nadbytku okysličovadla. Odběr byl proveden 15 cm nad ohněm hořáku při teplotě 1 200 °C a závěrem je, že pokud bude spalování probíhat za nejhorších podmínek, obsah toxických látek v produktech hoření je pod limitními hodnotami, vyjma oxidu uhličitého, který v neoptimálních podmínkách převyšuje přípustné hodnoty [33].

## POUŽITÉ ZDROJE

1. Nízkoteplotní katalytická depolymerizace. *GB Pyrolysis* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: [http://www.gbpyrolysis.com/sites/default/files/content/gb\\_pyrolysis\\_cz\\_2015.pdf](http://www.gbpyrolysis.com/sites/default/files/content/gb_pyrolysis_cz_2015.pdf)
2. Process Description. *Thermoselect* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.viveracorp.com/1%20process%20description%20eng.htm>
3. Chen, Dezhen, Lijie YIN, Huan WANG a Pinjing HE. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management* [online]. 2014, 34(12), 2466-2486 [cit. 2016-08-08]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14003596>
4. Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů [online]. 2010 [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.opzp2007-2013.cz/ke-stazeni/252/10821/detail/studie-zarizeni-na-pyrolytický-rozklad-odpadu-i/>

5. Honus, Stanislav, Juchelkova, Campen a Wiltowski. Gaseous components from pyrolysis—Characteristics, production and potential for energy utilization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2014, **106**, 1-8 [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237013002623>
6. Šejvl. *Technické systémy pro EVO* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.energis24.cz/300/technick%C3%A9-syst%C3%A9my-pro-evo>
7. *Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.cpga.cz/>
8. Biogreen: The pyrolyzer Spirajoule [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://www.biogreen-energy.com/spirajoule>.
9. Medek, J. (2018). Pyrolýza v praxi (Bachelor's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.).
10. STAF, Marek: Výzkum termické konverze odpadní biomasy na plynná a kapalná paliva. Biom.cz [online]. 2005-01-12 [cit. 2021-12-04]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-termicke-konverze-odpadni-biomasy-na-plynna-a-kapalna-paliva>>. ISSN: 1801-2655.
11. Polypetron GEN. 5: Sepco Industries [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://www.sepcoindustries.com/polypetron>.
12. Plastic Energy: Our Technology [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://plasticenergy.com/technology/>.
13. Kumagai, Shogo & Nakatani, Jun & Saito, Yuko & Fukushima, Yasuhiro & Yoshioka, Toshiaki. (2020). Latest Trends and Challenges in Feedstock Recycling of Polyolefinic Plastics. *Journal of the Japan Petroleum Institute*. 63. 345-364. 10.1627/jpi.63.345.
14. VŠB – Technická univerzita, fakulta strojní a FITE A.S. Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů I. [online]. 2010, [cit. 2015 – 02 - 09] Dostupné z: [http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003\\_pyrolyza\\_i.pdf](http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf)
15. Pyrolýza odpadů, moderní způsob jejich zneškodnění [online]. 2013 [cit. 2015-02-09]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/94618/pyrolyza-odpadu-moderni-zpusob-jejich-zneskodneni>
16. Bridgwriter, A. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2000, roč. 4, č. 1, s. 1- 73. DOI: 10.1016/S1364
17. RT7000: feedstock recycling, 2022. Recycling Technologies. <https://recyclingtechnologies.co.uk/technology/> ..
18. From plastic waste to virgin-grade products, 2022. ChemCycling™. <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling.html> .
19. Technology leadership in building the first and largest waste plastic to oil recovery CHP plant, 2022. Klean Industries. <https://kleanindustries.com/waste-processing-projects/plastic-pyrolysis-recycling/spr-japan/>

20. Sita UK and Cynar to built UK's first commercial plants to convert waste plastic to diesel, 2022. Green car congress. <https://www.greencarcongress.com/2010/11/sita-20101108.html>
21. Waste Plastic to Fuel Facility to be Built for SITA in Bristol, 2012. Waste management world. <https://waste-management-world.com/artikel/waste-plastic-to-fuel-facility-to-be-built-for-sita-in-bristol/>
22. Waste Plastic to Fuel Facility to be Built for SITA in Bristol, 2012. Waste management world. <https://waste-management-world.com/artikel/waste-plastic-to-fuel-facility-to-be-built-for-sita-in-bristol/>, 2010. Recycling International. <https://recyclinginternational.com/plastics/plans-for-uks-first-plastic-to-diesel-plants/9298>
23. Punkkinen, Henna, et al. Thermal conversion of plastic containing waste: a review. *Res. Rep*, 2017, D4.
24. Description, 2021. New Energy. <https://newenergy.hu/description/>
25. Park Sae, J. LG Chem to build supercritical pyrolysis plant to recycle plastic waste. <https://www.ajudaily.com/view/20220118104041771> **2022**
26. Mura Technology Accelerates with LG Chem, 2022. Chemical recycling. [https://www.chemicalrecycling.eu/news/mura-technology-accelerates-with-lg-chem/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=mura-technology-accelerates-with-lg-chem](https://www.chemicalrecycling.eu/news/mura-technology-accelerates-with-lg-chem/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=mura-technology-accelerates-with-lg-chem) .
27. Japan set for Hydro-PRT plastic recycling project, 2021. The engineer. <https://www.theengineer.co.uk/content/news/japan-set-for-hydro-prt-plastic-recycling-project>
28. Mura Technology, LG Chem accelerates global drive towards a circular plastics economy, 2022. hydrocarbon processing. <https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2022/01/mura-technology-lg-chem-accelerates-global-drive-towards-a-circular-plastics-economy>
29. Technológia: Hlbokové termické štiepenie - termicka depolymerizacia, 2022. Dron Industries. <https://www.dron.sk/sk/predstavenie-technologie>
30. Hruška, D. Využití pyrolýzy pro získání kapalných paliv. Bakalářská práce, VUT v Brně, 2018
31. Chemical recycling, 2022. Recenso. <https://www.recenso.eu/en/chemical-recycling-en.html>
32. Plastic Waste to Liquid Resource, 2021. Carboliq. [https://carboliq.com/pdf/1910\\_CARBOLIQ-flyer-K-2019.pdf](https://carboliq.com/pdf/1910_CARBOLIQ-flyer-K-2019.pdf)
33. Medek, J. Pyrolýza v praxi. Bakalářské práce, ČVUT v Praze, 2018