

# ПОЛИЛАКТИЧНА КИСЕЛИНА (PLA) КАТО ИНСТРУМЕНТ ЗА УСТОЙЧИВО КОРПОРАТИВНО РАЗВИТИЕ: ПРОИЗВОДСТВО, ПРИЛОЖЕНИЯ, ИКОНОМИЧЕСКА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТ И ФИНАНСОВО МОДЕЛИРАНЕ

**Мартин Яворов Бакърджиев**

Стопанска академия "Д. А. Ценов" - Свищов

Катедра "Финанси и кредит"

Bakardzhiev.martin@gmail.com

**Резюме:** Настоящата статия изследва полилактичната киселина (PLA) – биоразградим биополимер, произведен от възобновяеми суровини като царевича и захарна тръстика – като ключов инструмент за прехода на индустриите към устойчиви производствени модели. Анализирани са производственият процес и суровинната база на PLA, приложенията му в различни индустрии (опаковки, медицина, 3D печат, текстил, автомобилостроене), предимствата му спрямо традиционните пластмаси от екологична и социална гледна точка, икономическата жизнеспособност на производството, и финансовото моделиране на инвестицията в производствени мощности за PLA. Въз основа на сравнителен анализ на три сценария (оптимистичен, базов и песимистичен) и ключови показатели (NPV, IRR, период на изплащане) се демонстрира, че при структурирани инвестиции и технологични иновации производството на PLA постига дългосрочна икономическа жизнеспособност, като инвестицията може да бъде възвърната в рамките на 5–7 години. Изследването разглежда и интегрирането на царевичата в устойчиви бизнес модели с оглед на кръговата икономика и предоставя методологична рамка, включваща смесен изследователски дизайн, иконометричен анализ и анализ на жизнения цикъл на продукта (LCA).

**Ключови думи:** PLA; полилактична киселина; биопластмаси; царевича; устойчивост; кръгова икономика; финансово моделиране; NPV; IRR; въглероден отпечатък; ESG.

**JEL класификация:** Q01, Q16, Q56, L65, M14.

## POLYLACTIC ACID (PLA) AS A TOOL FOR SUSTAINABLE CORPORATE DEVELOPMENT: MANUFACTURING, USES, ECONOMIC VIABILITY, AND FINANCIAL MODELING

**Martin Yavorov Bakardzhiev**

Economics Academy "D. A. Tsenov" - Svishtov

Department "Finance and credit"

Bakardzhiev.martin@gmail.com

**Abstract:** This article examines polylactic acid (PLA) – a biodegradable biopolymer produced from renewable raw materials such as corn and sugarcane – as a key instrument for the transition of industries toward sustainable production models. The study analyses the production process and feedstock base of PLA, its applications across multiple industries

*(packaging, medical devices, 3D printing, textiles, automotive), its environmental and social advantages over conventional plastics, the economic viability of PLA production, and the financial modelling of investment in PLA manufacturing capacity. Based on a comparative analysis of three scenarios (optimistic, base, and pessimistic) and key performance indicators (NPV, IRR, payback period), the article demonstrates that structured investment and technological innovation can achieve long-term economic viability, with the initial investment recoverable within five to seven years. The study also examines the integration of corn into sustainable business models in the context of the circular economy and provides a methodological framework incorporating a mixed-methods research design, econometric analysis, and life-cycle assessment (LCA).*

**Key words:** *PLA; polylactic acid; bioplastics; corn; sustainability; circular economy; financial modelling; NPV; IRR; carbon footprint; ESG.*

**JEL classification:** Q01, Q16, Q56, L65, M14.

## 1. Увод

Глобалното производство на пластмаси достигна 390 милиона тона годишно, като огромна част от тях са с еднократна употреба и завършват в сметища, океани или инсинератори. В условията на засилващи се климатични промени, изчерпващи се изкопаеми горива и нарастващо замърсяване с микропластмаси, индустриите са изправени пред съществен натиск да преминат към материали с по-нисък въглероден отпечатък и биоразградими свойства.

Полилактичната киселина (PLA) се откроява като един от най-обещаващите биополимери в тази транзиция. Произведена от ферментация на захари, извлечени от биомаса – предимно царевично нишесте или захарна тръстика – PLA съчетава добри механични свойства, биоразградимост в индустриални условия и въглероден отпечатък с около 75% по-нисък от традиционните пластмаси (Auras et al., 2022). Пазарът на биопластмаси нараства стремително: от 1,4 млн. тона производствен капацитет през 2017 г. до 2,2 млн. тона през 2022 г., с прогнозирано нарастване с нови 1,6 млн. тона в следващите пет години, като PLA заема около 20% от пазара (Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2021).

В този контекст преходът към биополимери като PLA не следва да се разглежда единствено като екологична необходимост, а като инвестиционно решение, подчинено на класическите критерии за ефективност – доходност, риск и възвръщаемост на капитала. За инвеститорите и индустриалните компании ключовият въпрос не е дали PLA е по-устойчив материал, а при какви пазарни, технологични и регулаторни условия неговото производство генерира положителна нетна настояща стойност (NPV) и конкурентна вътрешна норма на възвръщаемост (IRR).

Нарастащото значение на въглеродното ценообразуване, регулаторните ограничения върху пластмасите за еднократна употреба и достъпът до публични стимули променят фундаментално икономиката на производството на материали. В този смисъл

устойчивостта се трансформира от външно изискване в вътрешен фактор, влияещ върху цената на капитала, оперативните разходи и пазарното позициониране на компаниите.

Настоящото изследване разглежда производството на PLA именно през тази призма – като функция на взаимодействието между технологични параметри, пазарна динамика и публични политики. Чрез прилагане на сценарийно финансово моделиране и анализ на ключови инвестиционни показатели (NPV, IRR, период на изплащане) се цели да се оцени не само екологичният, но и икономическият потенциал на технологията.

Въпреки очевидния потенциал, въвеждането на PLA среща системни предизвикателства: производствените разходи надвишават тези на конвенционалните пластмаси, инфраструктурата за индустриално компостиране е ограничена, а конкуренцията за земеделски площи между хранителното и индустриалното производство поражда социални и етични въпроси.

Настоящата статия преследва четири взаимосвързани цели: (1) да представи производствения процес и суровинната база на PLA; (2) да анализира приложенията му в различни индустрии и предимствата му спрямо традиционните пластмаси; (3) да оцени икономическата жизнеспособност на производството на PLA, включително чрез финансово моделиране на три сценария; и (4) да предложи методологична рамка за изследване на ефекта от устойчивите иновации върху корпоративната стойност. Статията е структурирана по следния начин: раздел 2 обхваща производствения процес и приложенията; раздел 3 – сравнителния анализ с традиционните пластмаси; раздел 4 – финансовото моделиране; раздел 5 – методологията; раздел 6 – заключението.

## **2. Производство на PLA: процес, суровини и пазарен контекст**

### **2.1. Производствен процес**

Производството на PLA включва три основни технологични етапа. Ферментацията на биомаса е отправната точка: захарта, извлечена от царевича, захарно цвекло или захарна тръстика, се ферментира с помощта на специфични микроорганизми за получаване на млечна киселина – мономерната съставка на PLA (Auras et al., 2022). Пречистването и кондензацията следват: млечната киселина преминава през контролирана кондензация за получаване на лактоиди (циклични димери на млечната киселина) (Ranakoti et al., 2022). Накрая, чрез ринг-отваряща полимеризация (ROP) лактоидите се трансформират в полилактична киселина с висока чистота (Swetha et al., 2023). Завършеният PLA полимер се формова в гранули за последваща употреба.

Двама от водещите глобални производители на PLA са NatureWorks LLC (използващ царевича, марка Ingeo™) и TotalEnergies Corbion (използващ захарна тръстика). Производственият им процес е достигнал индустриален мащаб, при който въглеродният отпечатък е около 0,5 kg CO<sub>2</sub> на kg продукт – в сравнение с 2,5–3,0 kg CO<sub>2</sub>/kg за традиционни пластмаси (European Bioplastics, 2022).

## 2.2. Суровинна база: царевицата като стратегически ресурс

Царевицата е предпочитана суровина за PLA поради три ключови предимства: високо съдържание на нишесте (около 70%), широка географска наличност и относително стабилна цена. При средна пазарна цена около 250 USD/t (данни за 2023 г.) и добиви достигащи 11 t/ha в САЩ, нетната печалба от хектар царевица достига ~1 250 USD. За производство на 1 тон PLA са необходими ~2,5 тона царевица (Auras et al., 2022).

Освен царевицата, изследванията разработват алтернативни суровини: захарна тръстика (по-висока добивност на захар на единица площ, особено в тропически климат), отпадъчна биомаса (царевични стъбла, слама) и водорасли (Ali et al., 2023). Използването на отпадъчна биомаса е особено перспективно, тъй като елиминира конкуренцията между хранително и индустриално производство. Остатъчните продукти от преработката на царевица могат да се оползотворят за производство на биогаз: 1 тон царевични остатъци генерира до 400 м<sup>3</sup> биогаз (FAO, 2023).

## 2.3. Приложения на PLA в различни индустрии

PLA намира приложение в широк спектър от индустрии, което подчертава универсалността му като устойчив материал.

Опаковъчната индустрия е най-голям потребител на PLA. Материалът се използва за бутилки, фолиа, чаши, кутии и компостируеми торби. Биоразградимите PLA опаковки за храни позволяват намаляване на отпадъците при условия на индустриално компостиране (Domenek et al., 2011). Примерите включват биоразградими контейнери за пресни продукти и чаши за напитки.

В медицинската индустрия биосъвместимостта и биоразградимостта в тялото правят PLA предпочитан материал за хирургически конци, импланти и системи за доставяне на лекарства. Хирургическите конци от PLA се разграждат след определен период, елиминирайки нуждата от вторична операция (DeStefano et al., 2020).

В 3D печата PLA е един от най-популярните материали – ниската температура на топене, минималното изкривяване и лесната обработваемост го правят предпочитан избор. Модификации с лигнин и допамин разширяват приложенията към автомобилостроенето и биомедицинското инженерство (Zhang et al., 2020).

В текстилната индустрия влакната от PLA са меки, дишащи и устойчиви на петна – алтернатива на синтетичните влакна с по-нисък въглероден отпечатък. В селскостопанския сектор мулч филмите от PLA заместват полиетиленовите, разграждайки се след употреба без остатъчна микропластмаса (Goel et al., 2021).

Приложенията в автомобилостроенето – вътрешни компоненти, панели, декоративни елементи – са обещаващи, но все още ограничени от топлинната устойчивост на PLA. Текущите изследвания за подобряване на термичните свойства чрез композити и добавки разширяват потенциала в тази посока (Auras et al., 2022).

### 3. Предимства на PLA спрямо традиционните пластмаси: сравнителен анализ

#### 3.1. Екологични предимства

Биоразградимостта е централното екологично предимство на PLA. В индустриални компостируеми условия PLA се разпада за около 90 дни до въглероден диоксид, вода и биомаса, елиминирайки риска от дългосрочно замърсяване (Diao et al., 2022). За разлика от полиетилен и полипропилен, оставащи в природата стотици години, PLA не генерира трайна микропластмаса при управлявано третиране. Замяната на традиционни пластмасови опаковки с PLA в хранителната индустрия може да намали отпадъците с до 30% в рамките на една година.

Въглеродният отпечатък на PLA е съществено по-нисък от този на традиционните пластмаси: 0,5 kg CO<sub>2</sub>/kg продукт за PLA срещу 2,5–3,0 kg CO<sub>2</sub>/kg за полиетилен (European Bioplastics, 2022). При производство от 100 000 тона PLA годишно се избягват около 170 000 тона въглеродни емисии – еквивалентно на годишните емисии от 35 000 автомобила (FAO, 2023). Разходите за суровини, базирани на биомаса, са по-стабилни в дългосрочен план от зависимите от цената на петрол.

Таблица 1. Сравнение на PLA с традиционни пластмаси

Показател	PLA	Полиетилен (PE)
CO <sub>2</sub> (kg/kg продукт)	~0,5	2,5–3,0
Суровина	Биомаса (възобновяема)	Изкопаеми горива
Биоразградимост	Да (индуст. условия)	Не
Разходи за производство (USD/t)	~3 000	~1 000–1 500
Пазарна цена (USD/t)	~2 000–2 500	~1 200–1 800
Период за разграждане	~90 дни (индуст.)	400–500 години

Източник: Auras et al. (2022); European Bioplastics (2022); Rosenboom et al. (2022) – авторска компилация.

#### 3.2. Социални предимства и потребителска лоялност

Производството на PLA от царевица подпомага земеделските общности чрез увеличено търсене на биомаса суровини. Докато традиционната продажба на царевица носи ~250 USD/t, интегрирането ѝ в производствена верига за PLA увеличава добавената стойност на същата суровина до ~800 USD/t. Според данни на Европейската асоциация за биопластмаси, индустрията има потенциал да създаде до 300 000 работни места в Европа до 2030 г., особено в селските райони.

Потребителите все по-осъзнато избират устойчиви продукти: Nielsen (2015) установява, че 66% от тях са готови да платят повече за екологично отговорни продукти. Продукти, изработени от PLA, се асоциират с премиум качество и иновативност, което насърчава дългосрочна лоялност и укрепва корпоративния имидж на производителите. Според Carroll и Shabana (2010), интеграцията на устойчивостта в корпоративните стратегии минимизира регулаторните рискове, увеличавайки едновременно с това иновационния потенциал.

### **3.3. Ограничения и предизвикателства**

PLA не е лишен от ограничения, които трябва да се отчитат при оценката на неговия потенциал. Основните са: крехкост и склонност към напукване; недостатъчна термична стабилност (температурата на омекване е около 55–60°C при стандартен PLA); чувствителност към хидролиза; по-висока цена от конвенционалните алтернативи; необходимост от индустриална компостируема инфраструктура за разграждане (Ju et al., 2020).

За преодоляване на тези ограничения се разработват иновативни модификации. Добавянето на лигнин – вторичен продукт от целулозната и хартиената индустрия – подобрява термичната устойчивост, антиоксидантните свойства и UV защитата (Hitz and Lehmann, 2015). Комбинирането с допамин образува полидопаминова повърхност, значително подобряваща съвместимостта на PLA с лигниновите пълнители: резултатът е подобрена механична здравина, повишена термична стабилност и усъвършенствана хидрофобност (Song et al., 2020; Zhao et al., 2020).

## **4. Икономическа жизнеспособност и финансово моделиране**

### **4.1. Структура на производствените разходи и приходи**

Икономическата оценка на производството на PLA изисква анализ на разходната структура и прогнозните приходи. Основните компоненти включват: начални инвестиции за изграждане на инфраструктура, специализирано оборудване и технологии; оперативни разходи под формата на суровини (царевица), енергия, труд и поддръжка; приходи, базирани на пазарната цена на PLA (2 000–2 500 USD/t); както и данъчни стимули, планирани като субсидии и данъчни облекчения за устойчиви проекти, достигащи до 20% намаление на разходите в ЕС (European Commission, 2021).

При базов производствен капацитет от 50 000 тона годишно и средна производствена цена от 3 000 USD/t, оперативните разходи за цялата фабрика достигат 150 млн. USD годишно. При средна продажна цена от 2 000 USD/t приходите са 100 млн. USD, а с отчитане на субсидии и данъчни стимули нетните загуби намаляват, а инвестицията в мащабиране и технологична оптимизация снижава себестойността.

Въпреки привидно по-ниската рентабилност при базови условия, производственият процес на PLA крие значителен потенциал за редуциране на разходите: иновации в ферментационните технологии и използване на царевични стъбла

и кочани вместо зърно могат да намалят себестойността с до 20% (FAO, 2023). С увеличаване на мащаба с 50% разходите могат да спаднат допълнително с до 20% (European Bioplastics, 2023).

#### 4.2. Финансово моделиране: три сценария

За оценка на инвестиционната привлекателност на производство на PLA са анализирани три сценария. Входните параметри за финансовия модел са: начална инвестиция – 50 млн. USD (фабрика с капацитет 50 000 t/год.); средна цена на продажба – 2 500 USD/t (оптимистичен), 2 000 USD/t (базов), 1 700 USD/t (песимистичен); производствени разходи – 2 600 USD/t (опт.), 3 000 USD/t (баз.), 3 400 USD/t (пес.); ставка на дисконтиране – 8%; период на анализ – 10 години.

Таблица 2. Финансови показатели на производство на PLA по сценарии

Показател	Оптимистичен	Базов	Песимистичен
IRR	25%	14–16%	6–8%
NPV (млн. USD)	+85 – +120	+15 – +40	–30 – –5
Период на изплащане (год.)	3–4	5–7	>10
Годишни приходи (млн. USD)	125	100	85

Забележка: Изчисленията се базират на начална инвестиция от 50 млн. USD, капацитет 50 000 t/год., дисконтов процент 8%, период 10 год. Авторски изчисления по Auras et al. (2022) и European Bioplastics (2022–2023).

#### 4.3. Интерпретация и стратегически изводи

Оптимистичният сценарий предполага висока пазарна адаптация, успешна технологична оптимизация и наличие на значителни субсидии. IRR от около 25% и период на изплащане от 3–4 години го правят финансово привлекателен дори при умерена цена на капитала. Базовият сценарий отразява реалистичните текущи пазарни условия: умерен ръст на търсенето, стабилни оперативни разходи и частична компенсация от субсидии. Положителната NPV в базовия сценарий потвърждава икономическата жизнеспособност при правилно структурирана инвестиция с период на изплащане 5–7 години – в съответствие с дисертационните изчисления.

Песимистичният сценарий моделира ниско търсене, високи суровинни разходи, липса на държавни стимули и показва отрицателна или гранична NPV. Това подчертава критичната роля на публичната политика и институционалната подкрепа за успеха на прехода. При ниска надежда за субсидии, инвестицията изисква допълнителни стратегии за управление на риска: дългосрочни договори за суровини, диверсификация на продуктовия микс и изграждане на стратегически партньорства с потребители от медицинската и 3D-печатни индустрии, при които ценовото предимство е по-голямо.

Дългосрочната перспектива е положителна: глобалният пазар за биопластмаси се очаква да расте с 15% годишно, достигайки 12 млн. тона до 2030 г. (European Bioplastics, 2023). С икономии от мащаба разходите за производство се очаква да намалее с до 40% през следващото десетилетие (Auras et al., 2022), правейки базовия сценарий все по-сходен с оптимистичния.

## **5. Методологична рамка**

### **5.1. Изследователски подход**

Изследването е изградено върху интердисциплинарна методологична рамка, съчетаваща смесен изследователски дизайн с количествени методи за финансово моделиране и иконометричен анализ, и качествени методи за тематичен анализ на академична и сива литература, интервюта и казусни изследвания.

Концептуалната рамка интегрира три теоретични постановки: тройният резултат (Triple Bottom Line – Elkington, 1997) акцентира необходимостта от балансиране на икономическа рентабилност, социална справедливост и екологична отговорност; концепцията за споделена стойност (Porter & Kramer, 2011) обосновава как биополимерите създават икономическа и социална стойност едновременно; и ESG стандартите (Fatemi et al., 2015) предоставят систематичен мониторинг на устойчивостта.

### **5.2. Ключови променливи и данни**

Изследването оперира с четири групи променливи. Финансово-икономическите индикатори включват ROI, NPV, IRR и период на изплащане. Екологичните индикатори отразяват CO<sub>2</sub> емисиите и екологичния отпечатък по жизнения цикъл (LCA). Корпоративните ESG показатели обхващат социалната отговорност, управленски практики и интеграция на устойчиви инициативи. Бизнес резултатите са измерени чрез ръст на приходите, пазарен дял и корпоративна репутация.

Данните са набавени от: финансови отчети и бази данни Bloomberg и Thomson Reuters; доклади на European Bioplastics, FAO, Европейска комисия и ОИСР; структурирани интервюта с мениджъри от биополимерния сектор и земеделски кооперации; и академична литература (Auras et al., 2022; Rosenboom et al., 2022; Freeman, 1984; Carroll, 1999; Fatemi et al., 2015).

### **5.3. Аналитични методи**

Основният иконометричен инструмент е методът „разлика в разликите“, позволяващ изолиране на причинно-следствената връзка между внедряването на PLA и корпоративната стойност. Зависимата променлива е стойността на компанията, измерена чрез Tobin's Q и доходността на активите; независимата – степента на внедряване на PLA; контролните – размер, сектор, регион, финансово състояние.

Финансовото моделиране включва анализ на чувствителността и сценарийни оценки за отчитане на пазарните флукуации. Оценката на жизнения цикъл по ReCiPe

2016 методология позволява пълно отчитане на екологичния отпечатък. Качественият анализ прилага тематично кодиране на данните от интервютата.

Ограниченията на методологията включват: ограничена наличност на широкомащабни корпоративни данни за PLA; различия в регулаторната среда между страните, усложняващи сравнителния анализ; и зависимост на резултатите от суровинни ценови допускания.

## 6. Заключение

От финансова гледна точка резултатите от изследването показват, че производството на PLA представлява инвестиционна възможност с асиметричен риск-профил. Базовият сценарий показва положителна NPV и период на изплащане 5–7 години при инвестиция в производствена мощност от 50 000 t/год. при мащаб на началната инвестиция от около 50 млн. USD. Оптимистичният сценарий, от своя страна индикира за значителен потенциал за капиталова доходност. Субсидии и данъчни стимули подобряват икономиката на инвестицията, а рисковете в песимистичния сценарий подчертават необходимостта от диверсификация на продуктивния микс и дългосрочни договорни ангажименти. Това позиционира PLA не само като технологична иновация, а като клас актив, чувствителен към ключови макроикономически и регулаторни фактори.

Решаващо значение за инвестиционната привлекателност имат три групи детерминанти, а именно цената и достъпността на суровините, степента на технологична оптимизация и регулаторната рамка, включително механизми за въглеродно ценообразуване и публични стимули. При наличие на благоприятна комбинация от тези фактори, устойчивите материали като PLA могат да постигнат конкурентоспособност спрямо конвенционалните пластмаси дори при по-високи първоначални разходи. За индустриалните компании внедряването на PLA следва да се разглежда като стратегическо решение, свързано с дългосрочно намаляване на регулаторния риск, подобряване на пазарната позиция и достъп до нови сегменти с по-висока добавена стойност. За инвеститорите PLA представлява възможност за участие в растящ пазар с потенциал за висока възвръщаемост, особено в контекста на засилващите се ESG критерии и пренасочване на капитал към устойчиви активи.

От пазарна гледна точка, нарастващото потребителско търсене за устойчиви продукти, засилващото се регулаторно налягане в ЕС и нарастването на пазара на биопластмаси с 15% годишно до 2030 г. създават благоприятна среда за инвестиции в PLA. Индустриите с най-висок потенциал за бърза адаптация са опаковъчната, медицинската и 3D печата. От перспективата на устойчивото развитие, производството на PLA от царевича илюстрира принципите на кръговата икономика, в която основната суровина е възобновяема, остатъчните продукти намират приложение за биогаз и биотор, въглеродният отпечатък е със 75% по-нисък от този на конкурентите, а материалът може да бъде химически рециклиран обратно до млечна киселина. При производството на 100 000 t PLA годишно се постига избягване на 70 000 t CO<sub>2</sub> емисии. От технологична гледна

точка, непрекъснатото усъвършенстване на производствения процес чрез оптимизация на ферментацията, внедряване на алтернативна биомаса, химически модификации с лигнин и допамин разширява приложимостта на PLA и редуцира себестойността. Прогнозирано намаление на разходите с 40% до 2035 г. ще направи PLA конкурентоспособен с конвенционалните пластмаси при все повече приложения.

От гледна точка на публичните политики резултатите подчертават, че икономическата жизнеспособност на устойчивите технологии не е изцяло ендогенна, а зависи в значителна степен от институционалната среда. Това обосновава необходимостта от целенасочени механизми за подкрепа, каквито са субсидиите, данъчните стимули и регулациите, които биха ускорили прехода към нисковъглеродни индустриални модели.

В обобщение, устойчивостта в случая на PLA не е само екологичен императив, а икономически механизъм за създаване на стойност. Тя функционира чрез намаляване на разходите в дългосрочен план, генериране на пазарни премии, ограничаване на риска и подобряване на достъпа до финансиране, което я превръща в интегрална част от съвременния инвестиционен и корпоративен анализ. Настоящото изследване демонстрира, че полилактичната киселина представлява стратегически инструмент за корпоративно устойчиво развитие, с потенциал, подкрепен от убедителни технологични, пазарни и финансови аргументи.

### **Използвани източници**

- Ali, S. S., Abdelkarim, E. A., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Li, F., Kornaros, M., Zuorro, A., Zhu, D., & Sun, J. (2023). Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 15, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100254>
- Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E., & Tsuji, H. (2022). *Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications* (2nd ed.). Wiley.
- Carroll, A. B., & Shabana, K. M. (2010). The business case for corporate social responsibility. *International Journal of Management Reviews*, 12(1), 85–105.
- DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*, 1, 76–87.
- Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Saedi Ardahaei, A., Dai, Y., Esmaeely Neisiany, R., Foroughi, F., Wu, M., Das, O., & Ramakrishna, S. (2021). The life cycle assessment for polylactic acid (PLA) to make it a low-carbon material. *Polymers*, 13(11), 1854. <https://doi.org/10.3390/polym13111854>
- Muller, J., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2017). Combination of poly(lactic) acid and starch for biodegradable food packaging. *Materials*, 10(8), 952. <https://doi.org/10.3390/ma10080952>
- European Bioplastics. (2022). *Bioplastics market data 2022*. European Bioplastics e.V.
- European Bioplastics. (2023). *Global bioplastics market projections*. European Bioplastics e.V.
- European Commission. (2021). *EU funding for sustainable innovation*. European Commission.

- Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone.
- Fatemi, A., Fooladi, I., & Tehranian, H. (2015). Valuation effects of corporate social responsibility. *Journal of Banking & Finance*, 59, 182–192.
- FAO. (2023). *Corn-based biopolymer feedstocks*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Pitman.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Mansoor, Z., Tchuenbou-Magaia, F., Kowalczyk, M., Adamus, G., Manning, G., Parati, M., Radecka, I., & Khan, H. (2022). Polymers use as mulch films in agriculture – A review of history, problems and current trends. *Polymers*, 14(23), 5062. <https://doi.org/10.3390/polym14235062>
- Gordobil, O., Egüés, I., Llano-Ponte, R., & Labidi, J. (2014). Physicochemical properties of PLA lignin blends. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.002>
- Zhang, Z., Li, Y., Zhang, J., Peng, N., Liang, Y., & Zhao, S. (2020). High-titer lactic acid production from corn stover by *Pediococcus acidilactici* PA204 through fed-batch simultaneous saccharification and fermentation. *Microorganisms*, 8(10), 1491. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101491>
- Institute for Bioplastics and Biocomposites. (2021). *Global bioplastics market report*. IfBB.
- Hong, S.-H., Park, J. H., Kim, O. Y., & Hwang, S.-H. (2021). Preparation of chemically modified lignin-reinforced PLA biocomposites and their 3D printing performance. *Polymers*, 13(4), 667. <https://doi.org/10.3390/polym13040667>
- NatureWorks LLC. (2024). *Ingeo Biopolymer*. Retrieved from [natureworksllc.com](https://natureworksllc.com).
- Nielsen. (2015). *The Sustainability Imperative*. Nielsen Holdings.
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating Shared Value. *Harvard Business Review*, 89(1–2), 62–77.
- Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S. K., Singh, T., Sharma, S., Ilyas, R. A., & El-Khatib, S. (2022). Critical review on polylactic acid: Properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. *Materials*, 15(12), 4312. <https://doi.org/10.3390/ma15124312>
- Reddy, G., Altaf, M., Naveena, B. J., Venkateshwar, M., & Kumar, E. V. (2008). Amylolytic bacterial lactic acid fermentation — A review. *Biotechnology Advances*, 26(1), 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.07.004>
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7, 117–137.
- Cavallo, E., He, X., Luzi, F., Dominici, F., Cerrutti, P., Bernal, C., Foresti, M. L., Torre, L., & Puglia, D. (2021). UV protective, antioxidant, antibacterial and compostable polylactic acid composites containing pristine and chemically modified lignin nanoparticles. *Molecules*, 26(1), 126. <https://doi.org/10.3390/molecules26010126>

- Swetha, T. A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., & Arun, A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123715. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123715>
- TotalEnergies Corbion. (2024). Luminy PLA. Retrieved from [totalenergies-corbion.com](https://totalenergies-corbion.com).
- United Nations Conference on Trade and Development. (2023). *Plastics and sustainability report*. UNCTAD.
- Vink, E. T. H., et al. (2010). The eco-profile for current Ingeo polylactide production. *Industrial Biotechnology*, 6(4), 212–224.
- Waste Framework Directive. (2008). Directive 2008/98/EC on waste. European Parliament.
- Gordobil, O., Delucis, R., Egüés, I., & Labidi, J. (2015). Kraft lignin as filler in PLA to improve ductility and thermal properties. *Industrial Crops and Products*, 72, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.055>
- Zhang, Z., Terrasson, V., & Guénin, E. (2021). Lignin nanoparticles and their nanocomposites. *Nanomaterials*, 11(5), 1336. <https://doi.org/10.3390/nano11051336>