



אילוסטרציה של תהליך ייצור אתנול מפסולת צמחית. משמאל: דוגמאות של סוגי פסולת שונים (קש, פסולת נייר וגזם) ביחד עם הריאקטור המעבדתי; במרכז: הסוכרים המופקים מהתהליך, יחד עם השמרים; מימין: האתנול המופק מהתהליך.

ידיים וחיטוי משטחים בחומרי חיטוי המבוססים על אלקוהול (כגון אלכוהול, ספטול ומגבוני אלקוהול). דבר זה מעלה את הביקוש העולמי לאלכוהול (בעיקר מסוג אתנול).

בישראל אין ייצור מקומי של אתנול בקנה מידה מסחרי, ולכן היא מייבאת כל שנה אתנול ברמת ניקיון 80% ומעלה בעלות של כ־40 מיליון ש"ח<sup>[1]</sup>. נתון זה צפוי לעלות עם התמשכות משבר הקורונה. ההסתמכות על יבוא בלבד בעייתית, מכיוון שסביר להניח שבעת מגפה יגדל הביקוש לאתנול אף יותר, ובעקבות זאת יעלה מחירו, וייתכן אף מחסור מקומי או אזורי בו, כפי שנצפה בהתפרצות הנוכחית. יתרה מכך, במקרה של סגירת גבולות יבוא אתנול עשוי להיות בלתי אפשרי. סימנים למחסור באתנול כבר נצפו, ומחיר האתנול העולה גרם למשרד הכלכלה להגביל את מחיר האלקוהול (החל ב־15 במרץ 2020, על פי פרסומים שונים) ולאסור זמנית על יצוא שלו<sup>[2]</sup>. הרוב המכריע של ייצור האתנול העולמי מבוסס על התססה של סוכרים המופקים מגידולים ייעודיים (קנה סוכר

## זבל של אדם אחד הוא אוצר של אדם אחר – שימוש בפסולת צמחית לייצור חומר חיטוי למאבק במגפת הקורונה

ברק הלפרן<sup>[1]</sup>\*, רועי פרץ<sup>[1]</sup>,  
ירוס גרשמן<sup>[2]</sup> והדס ממן<sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> ביה"ס להנדסה מכנית, הפקולטה להנדסה,  
אוניברסיטת תל־אביב

<sup>[2]</sup> המחלקה לביולוגיה וסביבה,  
פקולטה למדעי הטבע, אוניברסיטת חיפה ומכללת אורנים  
\* barakhalpern@mail.tau.ac.il

אחד מכלי המאבק העיקריים להתמודדות עם התפשטות נגיף הקורונה (SARS-CoV2) הוא הקפדה על היגיינה, בדרך של רחיצת

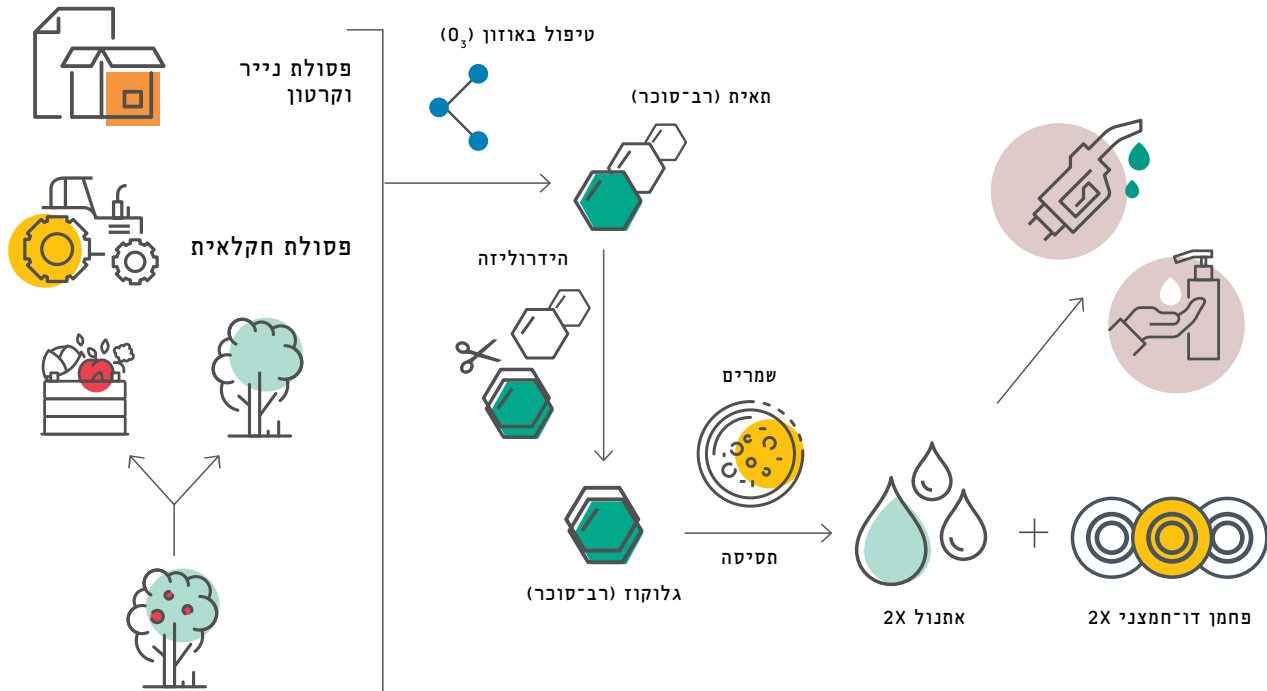
טבלה 1. הרכב סוגים נפוצים של פסולת צמחית<sup>141</sup>

פסולת צמחית	ליגנין (%)	צלולוז (תאית) (%)	המי-צלולוז (%)
ץע	25-30%	35-40%	20-30%
קש	15-20%	33-40%	20-25%
פסולת תירס	16-21%	28%	35%
פסולת נייר וקרטון	0-15%	85-99%	0
עלים	0	15-20%	80-85%
כוחנה	0	80-95%	5-20%
פסולת בננה	14%	13.2%	14.8%

בברזיל, גרעיני תירס בארה"ב וגרעינים שונים באירופה). מדובר בעובדה מדאיגה, כיוון שגידולים למטרות אנרגיה מתחרים עם גידולי מזון על שטחי החקלאות, המים, הדשן ומשאבים נוספים. אי לכך, מושקעים מאמצים רבים בייצור אתנול מפסולת, בדגש על פסולת צמחית (ליגנו-צלולוטית) כגון קש, פסולת נייר וקרטון, דשא וכיו"ב (טבלה 1 מתארת את הרכב הסוגים השונים של הפסולת). צמחים מורכבים בעיקר מצלולוז (תאית), שהוא פולימר של גלוקוז - התוצר הסוכרי שמקורו בתהליך הפוטוסינתזה. ניתן לפרק שרשרת רב-סוכרים זו בתהליך אנזימטי פשוט: אנזים (חלבון המזרז תהליכים כימיים ספציפיים) מסוג הידרולאז מזרז הגבה עם מולקולות מים לטובת שחרור מולקולות גלוקוז מהפולימר. האתגר הוא הנגשת אותו פולימר לאנזים, שכן, בדומה לבניין המורכב מפלדה ומבטון, התאית והליגנין שזורים אחד בשני, ונדרשת הפרדה. כיוון שכך, הנגשת הסוכרים מהפסולת הצמחית מחייבת תהליך רב-שלבי: איסוף הפסולת, גריסתה, טיפול-קדם שמפריד בין התאית לשאר רכיבי הפסולת (בעיקר ליגנין), ופירוק התאית לסוכרים שיהיו זמינים לשמרים לטובת תהליך התסיסה, שבו נוצר אתנול. פסולת צמחית נוכחת בתעשיות רבות: מזון, נייר וקרטון, כותנה

ועוד, היא מצויה בשפע, ויכולה להוות פתרון בר-קיימא לאדם ולסביבה (אתנול יכול לשמש גם תחליף דלק). עם זאת, נכון להיום טיפול-הקדם

איור 1. שלבי התהליך - מהפסולת ועד האתנול



של גזם רטוב שאין לו שימוש<sup>[3]</sup>, ויכולות להוביל, לפי ניסויי המעבדה שלנו, לייצור של כ-33,000 טונות אתנול בשנה (על בסיס חישוב של 100,000 טונות פסולת יבשה, מתוכה 50% תאית). הפשטות בייצור האזון והעובדה שלא נוצרים תוצרי לוואי, מאפשרות טיפול מבוזר סמוך למקור ההזנה שמונע את עלויות הובלת הפסולת. שימוש בגישה שלנו לייצור אתנול מפסולת צמחית יאפשר למדינת ישראל לייצר לעצמה את האתנול הנחוץ והמבוקש ללא תלות ביבוא לא יציב, בייחוד בזמן מגפות עולמיות. על בסיס המחקר המתואר כאן נרשם לאחרונה פטנט, ובימים אלה נבנה מחקר חלוץ חדשני בגן הזואולוגי באוניברסיטת תל-אביב בשיתוף משרד המדע, שנועד להוכחת הייתכנות מחוץ למעבדה לתהליך שפיתחנו (איורים 1, 2).

### מקורות

ראו פירוט באתר כתב העת.

דורש הקמת מפעלים יקרים מאוד, ולרוב מחייב שימוש בחומצות חזקות שדורשות תהליכי ניקיון של הפסולת לאחר הטיפול ושל הביוב שנוצר ועלול להוביל לתוצרי לוואי רעילים לתהליך התסיסה. במחקר שבוצע לאחרונה באוניברסיטת תל-אביב בשיתוף עם אוניברסיטת חיפה-אורנים, הודגם שטיפול מקדים בעזרת אזון מאפשר ייצור אתנול ביעילות טובה מגזם עירוני ומפסולת מחזור נייר. בשיטה זו פסולת טבולה במים מטופלת בגז אזון ( $O_3$ ) – גז לא יציב על פני כדור הארץ שנוטה להגיב עם חומרים אחרים. במקרה זה הוא מגיב עם המרכיבים הפנוליים של הפסולת (הליגנין). לאחר התגובה הופכות שאריות האזון לחמצן. אוזונציה (הוספת אזון) היא טיפול מקדים פשוט ויעיל לייצור אתנול, ללא צורך בשימוש בטיפול יקר ומזהם על-ידי חומצות חזקות או בטמפרטורה גבוהה<sup>[7,6,5]</sup>. בניגוד לטיפול-קדם מקובלים, אזון ניתן לייצור מקומי, לפי דרישה ובקנה מידה קטן. בישראל נוצרות כל שנה 620,000 טונות

### איור 2. שלבי טיפול-קדם באזון: הפרדת התאית ופירוק החומר הלא רצוי

ניתן לראות את הפירוק על פי שינוי צבע התמיסה מצהוב-כתום (מימין, תחילת הטיפול), לצהוב-ירקרק (5 דקות אוזונציה) ועד לצבע כמעט שקוף (משמאל, 10 דקות אוזונציה).

