



שהם מתכננים (אני מעדיפה כך: תחום חדש שזוכה להתעניינות הולכת וגוברת - במקום הביטוי "שתופס תאוצה" ששמור לשפה המדוברת. השינוי במבנה המשפט הוא לשם מה שנראה לי קריא יותר). המדענים האלה ניסחו חלופות בטוחות יותר לצבעים ולחומרים פלסטיים מזיקים והמציאו תהליכי ייצור חדשים המפחיתים פליטה של מזהמים לסביבה. הקו המנחה הראשון של "המכון לכימיה ירוקה", גוף הפועל כחלק מהחברה האמריקנית לכימיה (ACS), קובע ש"עדיף למנוע פסולת מאשר לטפל בה או לנקות אותה לאחר שנוצרה." אבל תוך כדי עבודתם להשגת המטרה הזאת, גילו החוקרים כמה תגליות המאפשרות לטהר מי שפכים מחומרים מזהמים והמבטיחות גם את פיתוחן של שיטות כדאיות מבחינה כלכלית.

אחת הדוגמאות של עבודה כזאת היא מחקר שנערך ב"מכון לכימיה ירוקה של חמצון" באוניברסיטת קרנגי מלון (מכון שאחד מאתנו, מר טרנס ג'יי קולינס, מנהל). חוקרי המכון פיתחו מולקולות של זרז הקרוי TAML (Tetra-Amido-Macrocyclic-Ligand) החומר המשפעל הזה פועל באמצעות מולקולות של מי-חמצן וחומרים מחמצנים אחרים ומפרק מגוון רחב של מזהמים עקשניים. מולקולות TAML מבצעות את המשימה על ידי חיקוי פעולתם של אנזימים בגופנו, אנזימים שהתפתחו בתהליך אבולוציוני כדי להגן עלינו מפני חומרים רעילים. במעבדה ובניסויים בשטח הוכח שמולקולות TAML מסוגלות לפרק חומרי הדברה מסוכנים, חומרי צבע ומזהמים אחרים. הן מסוגלות גם להפיג במידה ניכרת את הריחות, לסלק את הצבע של מי שפכים הנפלטים בתעשיית הנייר ולהרוג נבגים של חיידקים הדומים

כימאים המציאו סוג חדש של זרזים המסוגלים לפרק כמה מן המזהמים הגרועים ביותר עוד לפני שהם מגיעים לסביבה.

הדגים השוחים בנהר אנקוסטיה החוצה את לבה של הבירה ושינגטון, אינם נהנים כל כך מן המים. הנהר מזהם בשאריות מולקולריות של חומרי צבע, פלסטיק, אספלט וחומרי הדברה. בדיקות שנעשו לאחרונה מראות שעד 68% מדגי השפמנון בנהר לוקים בסרטן הכבד. גורמים רשמיים העוסקים בחיות הבר המליצו לדייגים המטילים את חכותיהם בנהר להשליך את הדגים ולא לאוכלם. הרחצה במים נאסרה.

אנקוסטיה הוא רק אחד מבין עשרות הנהרות הנגועים בזיהום קשה בארצות הברית. תעשיית הטקסטיל לבדה מזרימה לנהרות ולנחלים של אמריקה כל שנה 200 מיליארד ליטר של מי שפכים רוויים בחומרי צבע פעילים ובכימיקלים מסוכנים אחרים. סוגים חדשים של מזהמים צצים במי השתייה: שאריות של תרופות, חומרי הדברה, חומרים קוסמטיים ואפילו הורמונים למניעת היריון. לרוב הכמויות זעירות, והן נמדדות בכמה יחידות למיליארד או לטריליון (יחידה אחת למיליארד מקבילה לגרגר מלח אחד המומס בבֶּרֶכַת שחייה), אבל מדענים חוששים שאפילו כמויות מזעריות של כמה מן המזהמים האלה עלולות להפריע בתהליכי ההתפתחות הביוכימיים הקובעים את ההתנהגות, את מנת המשכל, את חוזק מערכת החיסון ואת כושר הרבייה של בני אדם.

למרבה המזל, הפתרון נראה באופק. בעשר השנים האחרונות התחילו החוקרים בתחום המדעי "כימיה ירוקה" - תחום חדש שלאחרונה תופס תאוצה - לעקור את גורמי הסיכון מן המוצרים ומן התהליכים הכימיים

* מאמר זה פורסם בגיליון יוני-יולי 2006, במגזין סיינטיפיק אמריקן ישראל, בהוצאת רשת אורט ישראל.
 ** מגזין Scientific American נחשב לכתב העת המוביל בעולם בתחומי המדע והטכנולוגיה זה יותר מ-157 שנה. המהדורה העברית מספקת, לצד חומרי מקור מתורגמים, התייחסות רחבה לעשייה מדעית גם בקונטקסט המקומי. אתר הבית: www.sciam.co.il

לאנתרקס הקטלני. אם תיושם השיטה, יוכלו חומרים מבוססי TAML לחסוך מיליוני דולרים בהוצאות הניקוי. זאת ועוד, המחקר מדגים שכימיה ירוקה מסוגלת לתקן מקצת הנזק הסביבתי שכבר גרמה הכימיה המסורתית.

הצורך להיות ירוק

סיבה מהותית לתסבוכת הסביבתית המחמירה שאנו מצויים בעיצומה, היא העובדה שבני האדם מבצעים את התהליכים הכימיים בדרכים אחרות מאלה של אמא טבע. מזה עידן ועידנים התפתחו תהליכים ביוכימיים המנצלים בעיקר יסודות נפוצים וזמינים כגון פחמן, מימן, חמצן, חנקן, גפרית, סידן וברזל, כדי ליצור את כל היצורים מסנדלית ועד עצי אורן ענקיים ומדגי שושן ועד בני אדם. לעומת זאת, התעשיות שלנו אוספות יסודות כימיים מכל פינות כדור הארץ כמעט ומפזרות אותם באופן שהוא זר לתהליך הטבעי. עופרת, לדוגמה, הייתה מצויה בעבר בעיקר במרבצים מבודדים מאוד, ולכן לא שילב אותה הטבע מעולם בתוך יצור חי. אבל כיום עופרת מצויה בכל מקום, בעיקר מפני שמוצרי הצבע, המכוניות והמחשבים שלנו פיזרו אותה בסביבה. כשעופרת מוצאת את דרכה לתוך גופם של ילדים, אפילו במינונים מזעריים, היא רעילה ביותר. הדבר נכון גם לגבי ארסן, קדמיום, כספית, אורניום ופלוטוניום. היסודות האלה הם מזהמים מתמידים – אין הם מתפרקים בגוף החי או בסביבה – ולכן יש צורך דוחק למצוא להם חלופות בטוחות יותר.

כמה מן המולקולות הסינתטיות החדשות המצויות בתרופות, בפלסטיק ובמוצרי הדברה הן מולקולות השונות כל כך מתוצרי הכימיה הטבעית, עד כי נדמה כאילו הן הגיעו אלינו מעולם אחר וזר. רבות מן המולקולות האלה אינן מתפרקות בקלות, אך אפילו כמה מן החומרים שמתכלים באופן טבעי מצויים בכל מקום סביבנו, מפני שאנחנו משתמשים בהם בפזרנות האם משפט זה מובן לך? לי לא. לבדיקה. מחקרים אחרונים מורים שכמה מן החומרים האלה מפריעים

להתבטאות הרגילה של גנים המעורבים בהתפתחות מערכת הרבייה הזכרית. מדענים יודעים כבר זה כמה שנים כי חשיפה טרום לידתית לפתאלאטים, תרכובות המצויות בפלסטיק ובתכשירי יופי, עלולה לשבש את מערכת הרבייה של גורי מכרסמים זכרים. שאנה ה' סוואן מבית הספר לרפואה ולרפואת שיניים באוניברסיטת רוצ'סטר דיווחה ב-2005 על תופעות דומות בתינוקות בנים. סוואן מצאה גם רמה גבוהה של קוטלי עשבים (כמו אלאכלור ואטראזין) בשתן של גברים בעלי ספירת זרע נמוכה מאזורים כפריים במיזורי. מזהמים עקשנים היוצאים מבתי החרושת שלנו, מן החוות ומן הביוב, יכולים לנוע ללא פגע באוויר, במים ובשרשרת המזון ולחזור לעתים היישר אלינו.

כדי להתמודד עם האתגר, כימאים ירוקים באוניברסיטאות ובחברות מסחריות חוקרים את האפשרות להמיר כמה מן המוצרים וכמה מתהליכי הייצור הרעילים ביותר בחלופות ידידותיות יותר לסביבה. שורשי עבודתו של הצוות של קולינס בקרנגי מלון נטועים בשנות ה-80, כשגברה הדאגה הציבורית מפני הסכנות הבריאותיות הנובעות משימוש בכלור. כלור שימש אז, כפי שהוא משמש לעתים קרובות גם היום, לניקוי ולחיטוי בקנה מידה נרחב בתהליכי ייצור ולטיפול במי שתייה. אף על פי שטיפול בכלור הוא תהליך זול ויעיל, הוא עלול ליצור כמה מזהמים קשים. הלבנת עיסת העץ בתעשיית הנייר באמצעות היסוד כלור הייתה המקור העיקרי לדיאוקסינים מסרטנים, עד שבשנת 2001 אסר המשרד האמריקני לאיכות הסביבה על השימוש בתהליך. רוב מפעלי הנייר מלבינים היום את עיסת העץ באמצעות כלור דו-חמצני, תהליך המצמצם את ייצור הדיאוקסינים אך אינו מונע אותו לגמרי. נמצא גם קשר בין תוצרי לוואי המתקבלים בהכלרה של מי שתייה לבין סוגי סרטן מסוימים. כלור בצורתו הטבעית הנפוצה, כינוי כלוריד או כמלחים מומסים במים, אינו חומר רעיל. אבל כשהיסוד כלור מגיב עם מולקולות אחרות, הוא עשוי ליצור תרכובות שעלולות לשבש את הביוכימיה של בעלי חיים. דיאוקסינים, למשל, מפריעים להתפתחות התא

מפני שהם מתערבים במערכת של קולטנים האחראים על בקרת ייצורם של חלבונים חשובים.

במקום להסתמך על כלור, תהינו שמא נוכל לנצל את חומרי הניקוי של הטבע – חמצן ומי-חמצן – כדי לטהר מים ולהפחית את הזיהום התעשייתי. החומרים האלה יכולים להרוס מזהמים רבים בעוצמה וביעילות, אבל בטבע התהליך דורש בדרך כלל שימוש באנזימים – זרזים ביוכימיים המגבירים עשרות מונים את קצב התגובה הכימית. זרזים, בין שהם טבעיים ובין שהם מעשי ידי אדם, פועלים כמו השדכנים של פעם, אבל במקום לקרב לבבות בין שני בני אדם, הם מאחדים מולקולות מסוימות, מאפשרים את התרחשותה של תגובה כימית ביניהן ומאיצים אותה. יש זרזים טבעיים המסוגלים להגביר את הקצב של תגובה כימית פי מיליארד. אלמלא אנזים ששמו טיאלין, המצוי ברוק שבפינו, היו חולפים שבועות עד שגופנו היה מצליח לפרק אטריות לסוכרים המרכיבים אותן. לולא האנזימים הייתה הביוכימיה מזדחלת בקצב אטי, והחיים, כפי שאנו מכירים אותם, לא היו מתקיימים.

אנזימים מקבוצת הפר-אוקסידאז הם המזרזים בטבע תגובות של מי-חמצן, הכימיקל הביתי המוכר המשמש לחמצון שיער ולהסרת כתמים משטיחים. פטריות יער המתקיימות מעצים מרקיבים משתמשות בפראוקסידאז כדי לנצל מי-חמצן לפירוק פולימרים של ליגנין בעץ. הפטריות שוברות את המולקולות הגדולות האלה וניזונות מן המולקולות הקטנות הנוצרות בפירוק. משפחה אחרת של אנזימים, ציטוכרום p450, מזרזת תגובות של חמצן (הקרויות תגובות חמצון). לדוגמה, בכבד של בני אדם מנצלים אנזימי ציטוכרום p450 את החמצן כדי להרוס ביעילות מולקולות רעילות רבות שאנו בולעים או שואפים.

במשך עשרות שנים נאבקים הכימאים לבנות מולקולות מלאכותיות קטנות שיוכלו לחקות את פעולתן של מולקולות האנזים הענקיות האלה. אם יוכלו מדענים לתכנן מולקולות בעלות יכולת זירוז יעילה כזאת, הם יוכלו להחליף את טכנולוגיות החמצון המבוססות על

כלור או על מתכות והמייצרות מזהמים רבים כל כך. אבל בראשית שנות ה-80 לא האיר המזל את פניו לחוקרים, ואיש מהם לא הצליח לפתח גרסאות מבחנה לאנזימים. במשך מיליארדי שנות אבולוציה שימש הטבע ככוריאוגרף של כמה מחולות כימיים אלגנטיים ומורכבים ביותר, שלעומתם נראו ניסויי המעבדה שלנו גולמניים להחריד. אבל ידענו שלא נוכל להשיג את המטרה של הפחתת הזיהום, אלא אם נמצא דרך לחקות את המחול המולקולרי הזה.

ממירים קטליטיים

ייצור אנזימים מלאכותיים פירושו בניית מולקולות שיהיו עמידות דיין בפני התגובות ההרסניות שהן בעצמן מזרזות. כל תגובה כימית שבה מעורב חמצן עשויה להיות הרסנית מפני שהקשרים הכימיים שחמצן יוצר עם יסודות אחרים (בייחוד עם מימן) הם קשרים חזקים מאוד. למולקולת מי-חמצן (H_2O_2) מבנה הדומה למולקולת מים (H_2O) מצד אחד ולמולקולת חמצן (O_2) מצד אחר, ולכן התרכובת הזאת היא מחמצן חזק. בתמיסה מימית, מולקולות מי-חמצן מגיבות באלימות שאפשר לכנותה "אש נוזלית". התגובה הזאת הורסת את המולקולות האורגניות (מכילות הפחמן) שסביב מי-החמצן. מהכרת המבנה של אנזימים טבעיים למדנו לדעת שכדי ליצור זרז פעיל, יש צורך כנראה בהצבת אטום ברזל בלב מערך של קבוצות אורגניות. ולכן היינו חייבים להקשיח את המבנה המולקולרי של הקבוצות האלה, כדי להבטיח שהן יעמדו בתגובה האלימה שעלולה להיווצר משפעול מולקולות מי-חמצן.

המשכנו אפוא לשאול מבנים מן הטבע, ובסופו של דבר פתרנו את הבעיה על ידי בניית זרז שבו מקיף ריבוע של ארבעה אטומי חנקן את אטום הברזל המרכזי המעוגן באמצע המולקולה. אטומי החנקן קשורים לאטום הברזל הגדול מהם בהרבה באמצעות קשרים קוולנטיים, כלומר באמצעות שיתוף זוגות של אלקטרונים. האטומים הקטנים המקיפים את אטום המתכת המרכזי במבנה כזה קרויים ליגנדים (ligands). בשלב הבא אנו מחברים



דלטון היא יחידה המקבילה לחלק ה-12 של מסת אטום פחמן 12, האיזוטופ הנפוץ ביותר של פחמן). לעומת זאת, המסה המולרית של אנזים פראוקסידאז המצוי בחזרת, שהוא אנזים קטן יחסית, היא כ-40,000 דלטון. המשפיעים הזעירים המבוססים על TAML זולים ופשוטים יותר לייצור, והפעילות שלהם מגוונת יותר מזו של מקביליהם הטבעיים.

מאז פיתחנו יותר מ-20 תרכובות שונות של זרזי TAML. עשינו זאת באמצעות חזרה על אותו תהליך תכנון ארבע-שלבי שאפשר לנו ליצור את הדגם הפעיל הראשון. לכל אחת ממולקולות ה-TAML קצב פעולה ואורך חיים משלה, והדבר מאפשר לנו להתאים במדויק את הזרזים למשימה שאנו מעוניינים לבצע. רוב הזרזים מכילים יסודות כמו פחמן, מימן, חמצן, חנקן וברזל שנבחרו בשל רעילותם הנמוכה. אנו מכנים כמה מן הזרזים בשם "TAML ציידים" מפני שהם מתוכננים לחפש ולהתביית על מזהמים או גורמי מחלה מסוימים, בדומה למוקש מגנטי הנמשך לגוף הברזל של הספינה. זרזי TAML אחרים פועלים כמו לפידים השורפים בעוצמה את רוב הכימיקלים הניתנים לחמצון שבסביבתם. לעומתם זרזים אחרים בקבוצה הם פחות תוקפנים ויותר בררנים, והם יתקפו, לדוגמה, רק חלקים מסוימים במולקולות או רק את המולקולות שקל לחמצן. אנו מצפים שיהיה אפשר להתאים את זרזי ה-TAML כדי לקדם את הכימיה הירוקה בעשורים הבאים. אף על פי שיש צורך לערוך בדיקות רעילות נוספות, התוצאות שהתקבלו מבדיקות שנעשו עד כה מורות שמולקולות TAML מפרקות את המזהמים למרכיבים בלתי רעילים ואינן משאירות זיהומים שאפשר לאתר. אנו מחזיקים היום ביותר מ-90 פטנטים בין-לאומיים לזרזי TAML, ויש עוד פטנטים בקנה. בבעלותנו גם כמה רישיונות מסחריים.

מעניין לציין שאין אנו יודעים עדיין את כל הפרטים לגבי אופן פעולתם של זרזי TAML. אבל מחקרים אחרונים סיפקו לנו כמה תובנות עמוקות לגבי התגובות המרכזיות. במולקולות ה-Fe-TAML במצב מוצק מצויה בדרך כלל מולקולת מים אחת הקשורה כליגנד לאטום

את הליגנדים זה לזה כך שהם יוצרים טבעת חיצונית גדולה הקרויה מבנה מאקרו-ציקלי. במשך הזמן למדנו איך לבנות את הליגנדים ואת המבנים המקשרים אותם כך שיעמדו בתגובות האלימות שמולקולות ה-TAML מעוררות. למעשה, הליגנדים שהמצאנו הפכו להיות מעין חומת מגן מפני ה"אש הנוזלית". ככל שהחומה מחזיקה מעמד זמן רב יותר, כך הזרז יעיל יותר. ועם זאת, לא רצינו כמובן ליצור זרז שאי אפשר לפרקו, מפני שזרז כזה עלול להגיע למי השפכים וליצור בעיות זיהום חדשות משל עצמו. זמן הפירוק של כל סוגי תרכובות ה-Fe-TAML שלנו (הבנויות ממולקולות TAML שבלבן אטום ברזל מרכזי) נע בין כמה דקות לכמה שעות.

לא היה קל להקים את חומות המגן של הליגנדים. הדבר דרש פיתוח של תהליך ארבע-שלבי מייגע. בשלב הראשון העלינו את התהליכים (או כל מונח רלוונטי) בדמיונו, ואחר כך ייצרנו מבנים של ליגנדים שקיוונו שיחזיקו את חומת המגן במקומה. בשלב השני חשפנו את הזרז לתנאים מחמצנים עד שחומת המגן התפרקה. בשלב השלישי מצאנו את המקומות המדויקים שבהן החלה ההתפרקות הזאת; מצאנו גם שהליגנדים מתחילים להתפרק תמיד בנקודה הפגיעה ביותר. בשלב האחרון, כשזיהינו במדויק את הקשר החלש ביותר, החלפנו אותו בקבוצות אחרות של אטומים שסברנו כי יחזיקו מעמד זמן רב יותר. לבסוף התחלנו את כל מעגל הפיתוח מחדש.

לאחר 15 שנים יצרנו סוף-סוף מולקולת TAML פעילה. ידענו שהצלחנו כשבוקר אחד התפאר קולין הורוביץ, פרופסור חוקר במכון שלנו, בתוצאותיו של ניסוי הלבנה באמצעות המבנה המתקדם ביותר שהיה בידינו בזמן ההוא. התבוננו בתוצאות, ואכן בכל פעם שטפטף הורוביץ טיפת צבע שחור לתוך תמיסה שהכילה זרז מסוג TAML ומי-חמצן, היא איבדה במהירות את צבעה. הבנו שסוף-סוף חומות המגן שלנו מחזיקות מעמד די זמן כדי לאפשר למולקולות ה-TAML לבצע את מלאכתן. המולקולות פעלו כמו אנזימים, אבל הן היו הרבה יותר קטנות: המסה המולרית של TAML היא 500 דלטון



זיהום של התקפת טרור ביולוגי. גילינו שאם משלבים את אחד מסוגי ה-TAML עם, התמיסה המתקבלת מסוגלת לנטרל בתוך 15 דקות 99.99999% מן הנבגים של החיידק *Bacillus atrophaeus*, מין הדומה מאוד לאנתרקס. התרכובת t-בוטיל הידרו-פראוקסיד היא נגזרת של מי-חמצן שבה מוחלף אחד מאטומי המימן בקבוצה כימית שבה יש אטום פחמן מרכזי הקשור לשלוש קבוצות מתיל (CH_3). אנו מקווים להשתמש בתרכובות Fe-TAML ובמי-חמצן גם ביישום חשוב אחר כדי ליצור בבוא היום חומר חיסוי זול להתמודדות עם חיידקים המעבירים מחלות דרך מים, חיידקים האחראים למקרים רבים כל כך של מחלות ומוות ברחבי העולם.

בשלושה ניסויי שטח חקרנו את יעילותן של תרכובות TAML בהפחתת הזיהום הנוצר בייצור נייר. בכל שנה מייצרת תעשיית הנייר והעץ יותר מ-100 מיליון טונות של עיסת נייר מולבנת המשמשת לייצור נייר לבן. מלבד שחרורם של דיאוקסינים, כלורו-פנולים ותרכובות אורגניות מסוכנות אחרות המכילות כלור, מזרימים מפעלי הנייר גם שפכים בצבע קפה שמכתימים בצבעם נחלים ונהרות וחוסמים את חדירת אור השמש לתוך המים. הפחתת האור מפריעה לתהליכי הפוטוסינתזה וכתוצאה מכך משפיעה על יצורים חיים התלויים בצמחים כמקור מזון. מקור הצבע הוא שברים גדולים של ליגנין, הפולימר המחבר בין סיבי הצלולוזה בעץ. הלבנה באמצעות כלור-דו-חמצני מסלקת את הליגנין מן הצלולוזה; שברי הליגנין הקטנים מעוכלים על ידי חיידקים ויצורים אחרים בברכות הטיפול, אבל הפיסות הגדולות אינן ניתנות לאכילה, והן מוצאות את דרכן לנהרות ולאגמים.

בחנו את יעילותן של תרכובות Fe-TAML בסילוק הצבע הנגרם משברים אלו בשני מפעלי נייר בארה"ב ובמפעל אחד בניו זילנד. בניו זילנד הכנסנו תרכובות Fe-TAML ומי-חמצן ל-50,000 ליטר של מי שפכים. בארצות הברית החדרנו את תרכובות ה-Fe-TAML היישר למגדלי עיבוד העיסה או לצינור השפכים במשך כמה ימים כדי להלבין את המים. בסך הכול תרכובות Fe-TAML סילקו

הברזל. המולקולה הזאת מכוונת בניצב לריבוע אטומי החנקן. בתמיסה מימית נקשרת מולקולת מים נוספת לצד הנגדי של אטום הברזל. מולקולות המים האלה קשורות בקשר רופף מאוד, ואם בתמיסה מצויות מולקולות של מי-חמצן, הן עשויות להחליף בקלות רבה את אחת ממולקולות המים ולהיקשר לאטום הברזל. כזשה קורה, ליגנד מי-חמצן מתארגן במהירות מחדש ומשחרר את שני אטומי המימן ואת אחד מאטומי החמצן שלו (הנפלטים כמולקולת מים - H_2O). אטום חמצן אחד נותר אפוא קשור לאטום הברזל המרכזי של מולקולת ה-Fe-TAML, הקרויה עתה בשם חומר ביניים פעיל (reactive intermediate - RI).

אטום החמצן אלקטרו-שלילי אלקטרו-שלילי הוא ביטוי אחד? אם כן - יש לכתוב "אטום החמצן הוא אלקטרו שלילי. לבדוק את כל המשפט שבמתכונתו חסר בו משהו. הרבה יותר מאטום הברזל. כלומר, גרעין אטום החמצן מושך אליו את אלקטרוני הקשר עם אטום הברזל ומרחיק אותם מגרעין הברזל. התופעה הזאת מגבירה את המטען החשמלי החיובי של אטום הברזל המרכזי במולקולת ה-TAML ועושה את חומר הביניים פעיל דיו כדי להוציא אלקטרונים ממולקולות שאפשר לחמצן בתמיסה. לא קבענו עדיין כיצד שובר חומר הביניים הפעיל את הקשרים הכימיים של מולקולות המטרה, אבל מחקרים הנערכים עתה עשויים לספק את התשובה בקרוב. עם זאת אנו יודעים לכוון את עוצמת הפעילות של TAML על ידי שינוי האטומים המצויים בצדי המולקולה. אם מציבים שם יסודות אלקטרו-שליליים, אנו יכולים למשוך עוד מטען שלילי מן הברזל ולהפוך את חומר הביניים לתוקפני אף יותר.

חוקק תעשייתי

בניית מולקולת TAML במעבדה אינה דומה להתאמת התהליך לשימושים מסחריים. עד כה הניבו בדיקות המעבדה והניסויים בשטח תוצאות מבטיחות. ניסויים במימון קרן המדע האמריקנית, לדוגמה, הראו שתרכובות Fe-TAML בתוספת מי-חמצן עשויות לטהר



גדול אחד של טכנולוגיית ה-TAML הוא השימוש בה אינו דורש הצטיידות מחדש בהיקף גדול. יותר מכך, תרכובות TAML עשויות בסופו של דבר לאפשר לחברות לחסוך כסף, מפני שהן מציעות דרך כלכלית יעילה לעמוד בחוקים הסביבתיים ההולכים ומחמירים בארה"ב, באירופה ובמקומות אחרים.

ההתקדמות העכשווית בכימיה הירוקה מייצגת רק כמה צעדי ביניים בדרך להתמודדות אמיתית עם האתגרים הסביבתיים הרבים של המאה ה-21. השאלה העמוקה יותר היא: האם אנו מתכוונים לנקוט בגישה של טיפול חירום או בגישה של רפואה מונעת? כיום רוב הכימאים עוברים עדיין הכשרה המכינה אותם לייצור תרכובות הבנויות בתחום כדי לפתור את הבעיה המסוימת שלשמה תכננו אותן, בלי להביא בחשבון את ההשלכות הרחבות יותר. למעשה, אנו עורכים ניסויים חובקי עולם על המערכות האקולוגיות שלנו ועל גופנו שלנו, וכשהניסויים האלה נכשלים, המחיר עלול להיות הרה אסון. השיטות החדשות של הכימיה הירוקה מציעות חלופה. המהפכה התעשייתית התפתחה ברובה ללא תכנון או מחשבה מראש. אולי עכשיו הגיע הזמן לנקוט כמה צעדים יצירתיים כדי לשנות את המגמה הזאת וכדי לסייע בהפיכת העולם שלנו, כמו גם העתיד שלנו – למקום שנוכל (או: שאפשר) לחיות בו.

ועוד בנושא

Toward Sustainable Chemistry. Terrence J. Collins in Science, Vol. 291, No. 5501, pages 48-49; January 5, 2001.

Rapid Total Destruction of Chlorophenols by Activated Hydrogen Peroxide. Sayam Sen Gupta, Matthew Stadler, Christopher A. Noser, Anindya Ghosh, Bradley Steinhoff, Dieter Lenoir, Colin P. Horwitz, Karl-Werner Schramm and Terrence J. Collins in Science, Vol. 296, pages 326-328; April 12, 2002.

מידע מקוון נוסף באתרים האלה:

www.cmu.edu/greenchemistry

www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acdisplay.html?DOC=greenchemistryinstitute\index.html

עד 78% מחומרי הצבע במים ו-29% מן התרכובות האורגניות מכילות הכלור.

פיתוח יישומים אחרים ל-TAML נראה מלהיב גם הוא. אריק גייגר מחברת "אוריתאן סוי סיסטמס" בעיר וולגה שבדרום דקוטה גילה שתרכובות Fe-TAML יעילות מאוד בעיבוד שמן סויה והפיכתו לפולימר שימושי. התכונות הפיזיקליות של הפולימרים האלה משתוות לאלה של מוצרי הפולי-אוריתאן הנפוצים כיום, ואולי אף עולות עליהן. תרכובות TAML עשויות למצוא שימוש גם במכונות כביסה: בסדרת בדיקות נוספת מצאנו שהכנסת כמויות קטנות של זרז לסוגים מסוימים של כביסה ביתית, מבטלת את הצורך להפריד בין כביסה לבנה לכביסה צבעונית. תרכובות TAML מסוגלות למנוע צביעה הדדית של כבסים, מפני שהן תוקפות את חומרי הצבע לאחר שניתקו מבד אחד ולפני שנצמדו לבד אחר.

אנו עובדים עכשיו על פיתוח משפחה חדשה של תרכובות TAML. תרכובות אלה מסוגלות לשבור את הקשרים המולקולריים היציבים מאוד המאפשרים לתרופות ולכימיקלים חקלאיים לחדור ללא פגע למי השתייה.

על אף ההצלחות בבדיקות, עדיין לא פתרנו את כל השאלות הקשורות בחומרים המשפעלים מסוג TAML. יש צורך לערוך בדיקות נוספות בהיקפים תעשייתיים, וחשוב לוודא שתרכובות TAML אינן יוצרות סוג כלשהו של זיהום שלא הבחנו בו עד כה. במקרים רבים מדי בעבר סברו שטכנולוגיות כימיות חדשות שזה עתה יצאו לשוק אינן מזיקות כלל, אך עשרות שנים לאחר מכן התבררו ההשלכות השליליות וההרסניות שלהן. אנו רוצים לעשות ככל יכולתנו כדי להימנע מהפתעות כאלה עם תרכובות TAML.

גם למחיר יש השפעה. אף על פי שנראה שתרכובות TAML עשויות לעמוד בתחרות ברוב היישומים, השקיעו החברות הגדולות השקעות גדולות מאוד בתהליכים הכימיים שבהם הן משתמשות היום. מעבר למערכות חדשות ולשיטות חדשות דורש בדרך כלל השקעות גדולות, גם אם השיטות החדשות פועלות. יתרון