

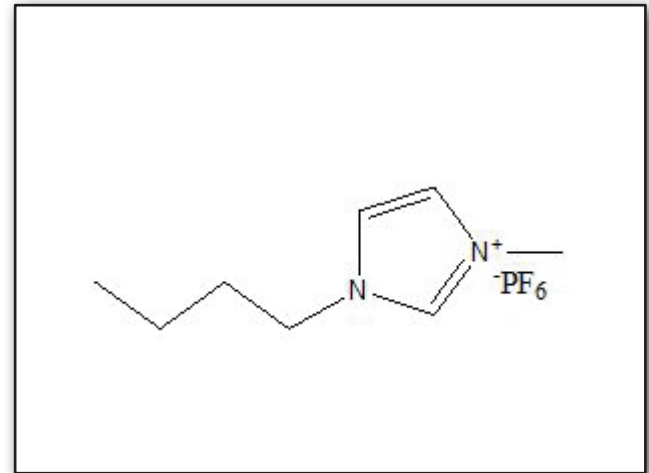
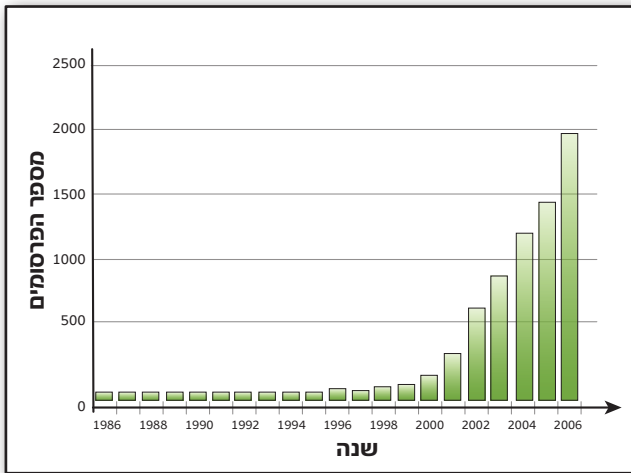
נוזלים יוניים: סיכויים וסיכונים

ד"ר עבד עזב, חוקר ב"אגודת הגליל" (כימיה של צמחי מרפא וכימיה סביבתית)

לש-הידראט שלו, $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, נקודת היתוך של 100°C (מתפרק). למלח בריום כלוריד, BaCl_2 , נקודת היתוך של 962°C ואילו לדו-הידראט שלו, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, נקודת היתוך 120°C ¹. הדבר איננו מפתיע כמובן, לאור העובדה כי כניסת מולקולות המים לתוך הסריג היוני גורמת להרחקת המטענים המנוגדים זה מזה ולהחלשת המשיכה ביניהם. אבל בימינו כאשר מדובר על נוזל יוני, Ionic Liquid, IL, הכוונה היא בדרך כלל לנוזלים יוניים בתנאי החדר, שאינם כוללים יונים מתכתיים. קיימת מחלוקת בספרות המדעית לגבי החומר הראשון שנחשב לנוזל יוני. החומר הראשון שמתאים להגדרה של נוזל בטמפרטורת החדר ($\text{MP} < 25^\circ\text{C}$) הוא אתיל-אמוניום-ניטרט, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3^+\text{NO}_3^-$ (1) שהוכן ע"י P. Walden בשנת 1914². לחומר זה נקודת היתוך של 12°C אבל אין הוא יציב, והשימושים בו זניחים. נוזלים יוניים כמעט ונשתכחו מהתודעה של הכימאים עד לסוף שנות ה-90 של המאה הקודמת, שבהן סונטזו

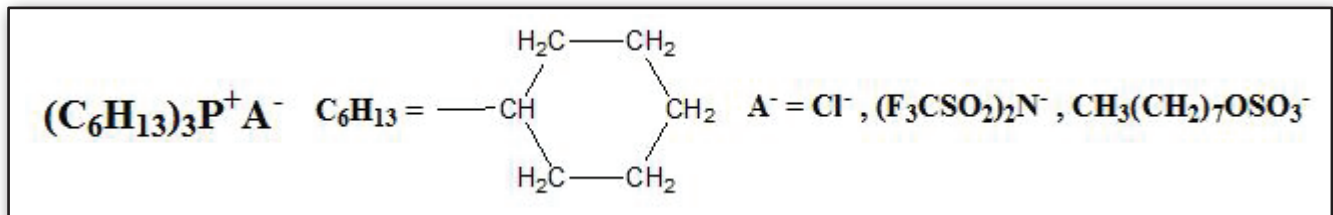
א. גילוי והגדרה

נהוג לחשוב שהוראת הפרק שעוסק בחומרים (וסריגים) יוניים ברמה של ביי"ס תיכון או מכללה, היא אחת המשימות הקלות של המורה. לחומרים יוניים, בניגוד לחומרים מולקולריים, תכונות הרבה יותר ברורות וקבועות. המשיכה בין המטענים החשמליים ההפוכים בחומרים היוניים יוצרת חומרים מוצקים בטמפרטורת החדר (חלקם הגדול מסיס במים) שטמפרטורות היתוך שלהם גבוהות והגבישים שלהם שבירים. אבל בעבודתנו במעבדות אנו נתקלים לא פעם במלחים אי-אורגניים שעם מעט חימום, או פשוט ביום קיצי חם, רק פותחים את הצנצנת ומיד מתגלה לתדהמתנו נוזל. למשל, לחומרים היוניים AsCl_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{S}$, $\text{Al}(\text{BH}_4)_3$, BiH_3 , AsF_3 , נקודות היתוך של -64.5 , 0 , -16 , -5.9 , -67°C בהתאמה.¹ כאשר מדובר בהידרטים, נקודות היתוך צונחות. לאלומיניום כלוריד, AlCl_3 , נקודת היתוך של 196.2°C ואילו

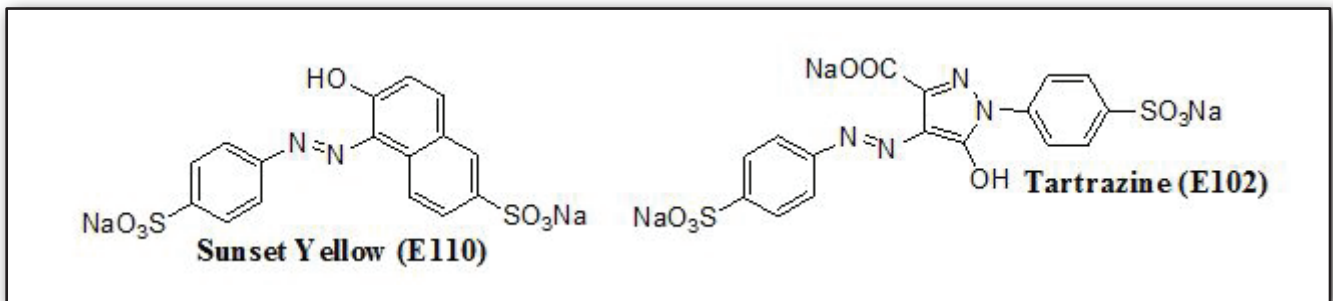


גרף 1: מספר הפרסומים האקדמיים אודות נוזלים יוניים בשנה

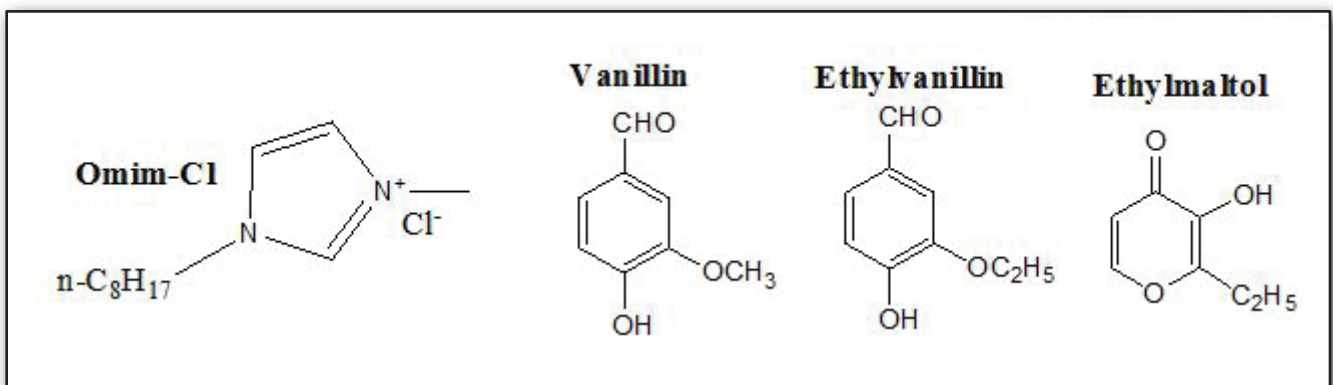
איור 1



איור 2



איור 3



איור 4

בדרך כלל אתגר לא פשוט לכימאי האנליטי שרוצה להפריד חומצות אלה מיתר מרכיבי התערובת ולהפריד אותן זו מזו. נוזלים יוניים נמצאו כמסייעים בתחום זה, וזאת לפי מחקר שפורסם באחד העיתונים החשובים ביותר העוסקים בכימיה של מזון.⁸ ההפרדה בוצעה בעזרת ארבעה נוזלים יוניים על בסיס חנקן-חיובי ועל בסיס זרחן-חיובי, והיא כללה תערובות של חומצות שומן עם שרשרות C_{18} - C_{22} , רוויות ובלתי-רוויות (בדרגות שונות ועם גיאומטריות ציס וטרנס).

גם ריכוזים של תבלינים אפשר לקבוע ע"י מיצוי בנוזלים יוניים כפי שמדווחת הקבוצה הסינית של H.-B. Zhu ושותפיו בשנת 2014.⁹ הם מיצו ונילין (וניל), אתיל-ונילין (שוקולד) ואתיל-מלטול (פירות משומרים). איור 4 מציג את מבני החומרים והנוזל היוני שבו בוצע המיצוי.

ג. שימושים בולטים של נוזלים יוניים בכימיה סביבתית

המבנה המיוחד של נוזלים יוניים שממנו נובעות התכונות המיוחדות שלהם¹⁰ - במיוחד צמיגותם הגבוהה, ביצוע תגובות כימיות בתוכם כממסים, כממסים-זרזים או כממסים-מגיבים - פתח בפני הכימאים שער למגוון רחב של תגובות שלא היו ידועות או לא היו אפשריות לפני כן. כך למשל, L. Li ושותפיו,¹¹ מדווחים על שימוש בנוזל יוני (כזרז-שותף) להרחקת יוני מתכות רעילות ממים כשיטה ירוקה לטיהור מים מזוהמים. ובתחום זה של איכות-הסביבה מושקעים מאמצים אינטנסיביים כדי לנצל נוזלים יוניים לייצור דלק ירוק-מתחדש. אחד המקרים הבולטים הוא הסינתזה של ביודיזל (Biodiesl).¹² נזכיר רק שביודיזל הוא תוצר טרנס-אסטרפיקציה של שמן צמחי (לרוב פסולת שמן) לאסטרים מתיליים/אתיליים של החומצות השומניות (ראו איור 5), וכך עולה אחוז המימן בדלק, והוא הופך לפחות מזהם (פחות פליטה של $CO_{2(g)}$).

בנוכחות סוגים שונים של נוזלים יוניים, התגובה נותנת אחוזי המרה גבוהים יותר בהשוואה לממסים אחרים, ובחלק מהמקרים שימש הנוזל היוני עצמו כזרז. הבעיה היחידה (והגדולה) בשיטה זו היא המחיר הגבוה של הנוזלים היוניים, דבר שהופך אותה ללא רלוונטית מבחינה כלכלית. בתחום הדלק הקונוציונלי, הבעיה הגדולה ביותר מבחינה סביבתית היא נוכחות תרכובות גפרית בתוך הדלק, וכן העובדה שעם שרפתו הן פולטות גפרית-דו-חמצנית, $SO_{2(g)}$. גז זה הוא כידוע אחד המזהמים האחראים על נזקי

חומרים יציבים יחסית כמו 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate או BMIM-PF₆ (איור 1).³ לחומר זה, שהוא יציב יחסית, נקודות היתוך של $-8^{\circ}C$. בחינה של המבנה המולקולרי של נוזלים יוניים יכול להסביר תכונה מיוחדת זו: היות החיובי נפחי מאוד (Bulky), והמטען החיובי ממוסך ע"י הקבוצות הקשורות אליו. רוב הנוזלים היוניים כוללים אטום חנקן חיובי (אמוניום) אבל חלקם כוללים אטומים אחרים. גם היות השלילי יכול להיות פשוט (הליד) או נפחי, כפי שרואים באיור 2.⁴

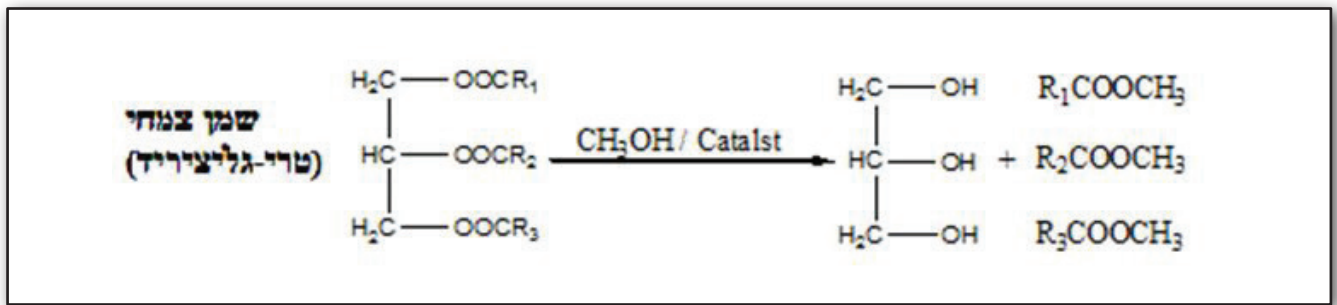
בתחילת שנות האלפיים חלה עלייה דרמטית במחקר של נוזלים יוניים, והיא נמשכת ומתגברת מאז. אחד המאמרים הבולטים הממחישים את הקביעה האחרונה פורסם ע"י Plechkova & Seddon בשנת 2008.⁵ הם סוקרים את ההתפתחות במחקר ואת יישומי הנוזלים היוניים וכן את החברות המסחריות שקמו בעקבות התפתחות זו וחלק מהיישומים הבולטים (שנתייחס אליהם בהמשך) של תופעה זו (ראו גרף 1).

ב. נוזלים יוניים כממסים

מאמר סקירה מעניין שמתייחס להיבטים תאורטיים ומעשיים של תכונות נוזלים יוניים כממסים פורסם בשנת 2010 ע"י Khupse & Kumar מהודו.⁶ בניגוד לרוב הממסים האורגניים שאינם קוטביים, לנוזלים יוניים קיטוב גבוה יחסית, ויש לו אפשרויות ביטוי רבות שאינן קיימות בממסים אורגניים רגילים ואפילו במים. אם נביא בחשבון כי מכפלת המסיסות במים של סידן-פחמתי, $CaCO_{3(s)}$, היא $K_{sp} = 3.3 \times 10^{-9}$, חישוב מהיר יראה כי המסיסות שלו היא 0.00013 mol/L . לעומת זאת, מסיסות אותו חומר ב- BMIM-Cl היא 0.21 mol/L שהם 2.21 g .

העובדה שמצד אחד הנוזלים היוניים קוטביים ומצד שני הם כוללים חלקים הידרופוביים, היא יתרון גדול כאשר מדובר במיצוי של חומרים שיש להם תכונות דומות. כך למשל, אפשר בעזרת BMIM-Br למצות כמויות קטנות מאוד של צבעי מאכל ממזונות שונים כדי לקבוע אם היצרן שהשתמש בצבעים אלה חרג מהתקנים או לא. מקרה כזה דווח לגבי שני חומרי הצבע הצהובים (בדומה לכורכום) Sunset Yellow, Tartrazine (ראו איור 3).⁷

תערובת המכילה חומצות שומן ארוכות-שרשרת, מהווה

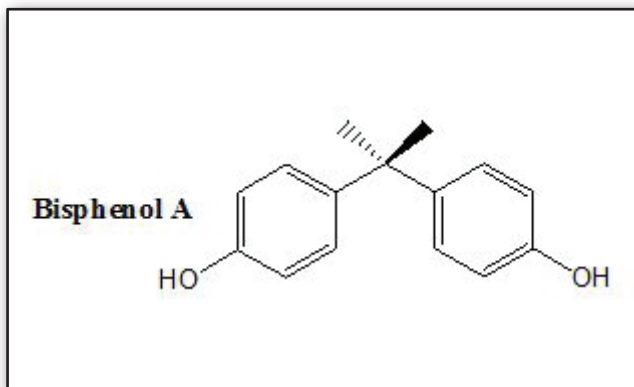


איור 5

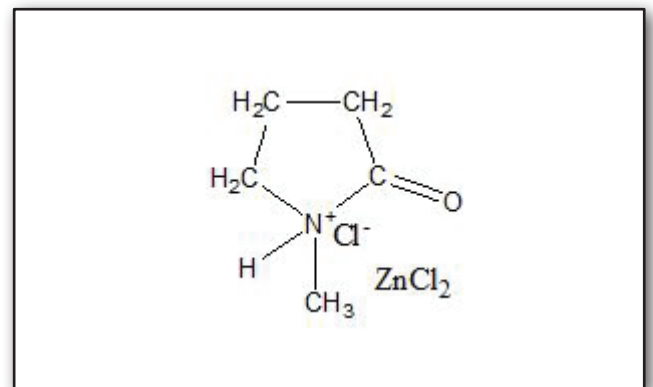
טבלה 1: תוצאות מיצוי של תרכובות גפרית מדיזל בעזרת נוזלים יוניים (לפי Dharaskar, 2012)

ניסוי	נוזל יוני/חומצת-לואיס והיס המולרי ביניהם	ריכוז הגפרית (ppm) אחרי המיצוי ^a
1	BMIM/AlCl ₃ , 0.35/0.65	275
2	^b EMIM/AlCl ₃ , 0.35/0.65	335
3	[HN(C ₆ H ₁₁)(C ₂ H ₅) ₂] ⁺ CH ₃ SO ₃ ⁻ /HN(C ₄ H ₉) ⁺ CH ₃ SO ₃ ⁻ , 1/1	310

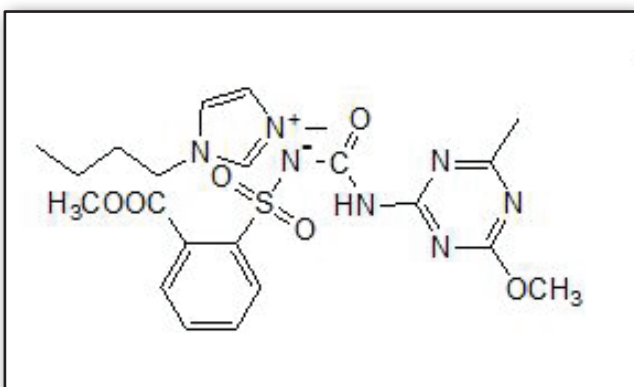
(a) הריכוז ההתחלתי היה 500ppm בתוך C₁₂H₂₆:n; E פירושו קבוצת אתיל C₂H₅ במקום קבוצת n-Butyl.



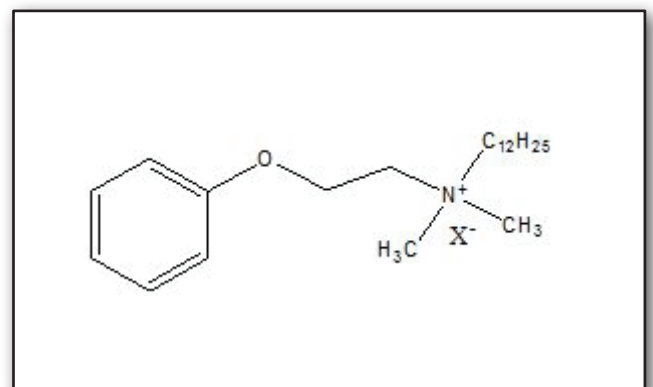
איור 7



איור 6



איור 9



איור 8

קבוצת מחקר משותפת מניגריה וגרמניה דיווחה כי בשימוש בנזל היוני BMIM-N(CN)₂, הם הצליחו לסנטז ננו-תחמוצות שונות של מוליבדן (MoO₃, Mo₄O₁₁, Mo₁₇O₄₇) בקוטר של 17.5nm בתחום הסינתזה האורגנית (לחמצונים שונים, כמו חמצון אתרים לדיאולים).

בהקשר זה הופיעו עבודות רבות אודות הסינתזה של ננו-חלקיקים של החומר TiO₂ שתכונותיו הקטליטיות הן עצומות, במיוחד כאשר מדובר בטיהור מים ופירוק מזהמים אורגניים שהם נגזרות של פנול. אחת העבודות האחרונות הראויות לציון היא עבודתם של T. Ravishankar ושותפיו מהודו,¹⁸ שסינתזו ננו-חלקיקים של TiO₂ בקוטר של 37nm. חלקיקים אלה הראו יכולת גבוהה מאוד בפירוק פוטוקטליטי של חומר מודל (Trypan Blue, C₃₄H₂₈N₆O₁₄S₄) וכן יכולת גבוהה של חיזור קטליטי של היונים הרעילים והמחמצנים מאוד של Cr⁶⁺ (תעשיית הציפויים) ליונים בטוחים יותר שהם כרום(III).

בצעד מתקדם עוד יותר הכינו J. Xia ושותפיו מסין, נקודות-קוונטיות^B של גרפין/BiOX (X, הליד).¹⁹ החוקרים מדווחים כי לחלקיקי החומר היה קוטר ממוצע של 5nm, והוא סונטז בעזרת MIM-X, כאשר C₁₆ היא קבוצת CH₃(CH₂)₁₅ המחליפה את קבוצת הבוטיל ב-BMIM, ואילו X הוא יון הליד. החומרים ששימשו כמודלים לפוליפנולים מזהמים היו: Rhodamine B, Ciprofloxacin, Bisphenol A (ראו איור 7).

ה. יישומים רפואיים נבחרים של ננזלים יוניים

אחד המאמרים המקיפים הסוקר את היישומים הרפואיים של ננזלים יוניים, ראה אור בשנת 2014.²⁰ מאמר זה אינו מדווח על תוצאות של החוקרים עצמם אלא סוקר בהרחבה מאמרים שהופיעו עד אז, והוא מומלץ מאוד לקריאה. עיקר ההתמקדות של המחברים היא בתפקוד של ננזלים יוניים מבחינה פרמקולוגית של Drug Delivery.

שני חוקרים בריטיים סקרו בשנה שעברה מאמרי מחקר רבים שהוכיחו כי לננזלים יוניים יכולות אנטי-בקטריאליות בולטות,²¹ לרבות בתחום מניעת היצירה של ביו-פילמים.⁹ בין אלה בולטת במיוחד קבוצת הננזלים היוניים בעלי המבנה הכללי כפי שמופיע באיור 8.

שימוש בננזלים יוניים מסובכים מעט יותר מבחינה מבנית ממה שראינו עד כה, דווח ע"י קבוצת חוקרים מפולין כריסוס

סביבה עצומים, לרבות תחלואה של בני אדם. במקרים נדירים שרפה של תרכובות גפרית שבדלק יוצרת גפרית-תלת-חמצנית, SO_{3(g)}, שהסכנה הגדולה ביותר שלה היא יצירת חומצה גפריתית (H₂SO₄) במגע עם מים ויצירת סביבה חומצית הרסנית. בעניין זה מאמר הסקירה של A. Dharaskar ממצה את תוצאות המחקר עד 2012.¹³ התוצאות שהמאמר מציג אינן מעודדות משתי בחינות. מחיר הננזלים היוניים היקר והתוצאות שהושגו. בהתחשב בעובדה כי הריכוז המקסימלי של גפרית בדלק לפי התקן הישראלי והתקן האמריקני הוא 20ppm ולפי התקן האירופי הוא 15ppm - אפשר לראות בטבלה 1 כי התוצאות אינן מרשימות, וזאת בלשון המעטה.

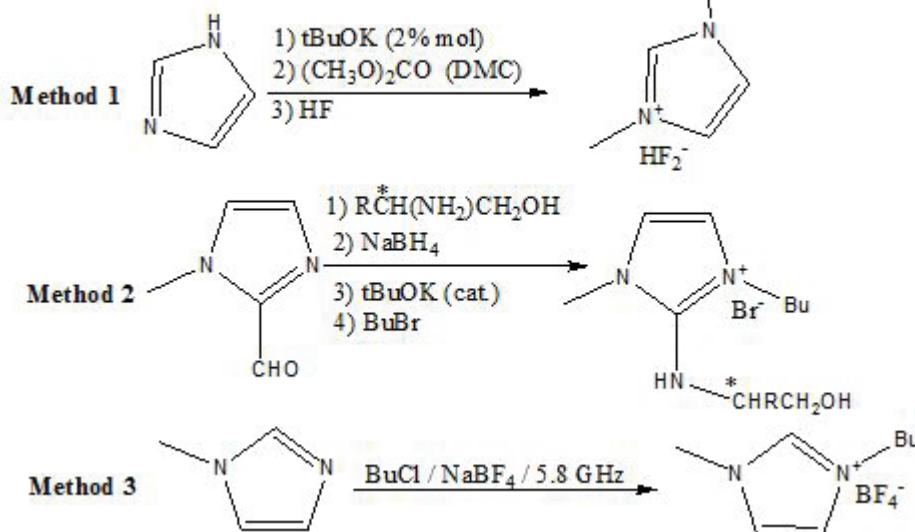
המחקרים בתחום זה של הרחקת גפרית מדלק, בעזרת ננזלים יוניים ובשיטות אחרות, ממשיכים להתפרסם באופן עקבי בקצב של כמה עשרות מאמרים בשנה. אחד האחרונים שהופיעו ואשר מדווח על תוצאות טובות ככל שמדובר בריכוז הגפרית אחרי המיצוי (והחמצון), הוא מחקרו של X. Chen ושותפיו.¹⁴ הם הגיעו לריכוז גפרית של 5.3ppm (הריכוז ההתחלתי היה 500ppm) כאשר השתמשו במערכת (איור 6).

אבל גם במקרה זה החיסרון הגדול הוא שיטה לא קלה לביצוע ומחיר גבוה של המגיבים/ממסים.

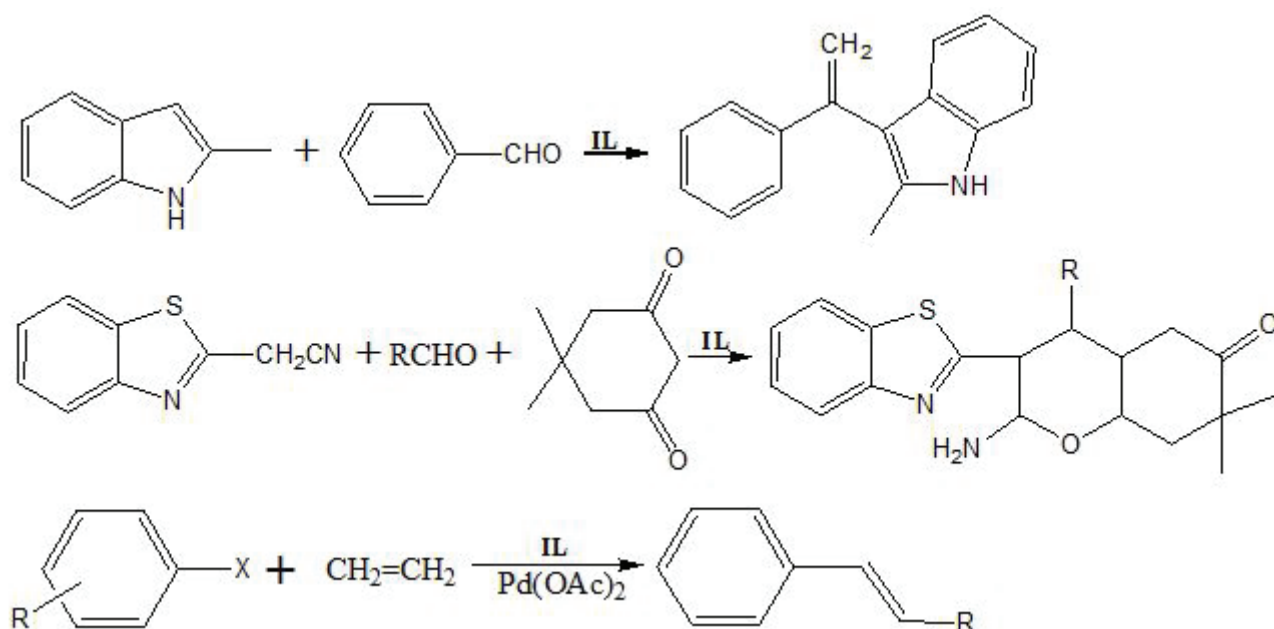
ד. ננזלים יוניים וננוכימיה: היתרון הגדול

ננוכימיה וננו-חלקיקים הפכו כיום לכלי שימושי רב-עצמה בכל הרמות: מחקר כימי, שמירה על איכות הסביבה, רפואה וכמובן בתחומי הפיזיקה היישומית השונים. עם הזמן התברר כי לננזלים יוניים יתרון עצום על פני ממסים אחרים כאשר מדובר בסינתזה של ננו-חלקיקים ליישומים שונים. חשוב כבר לציון, כי בניגוד לממסים אחרים, ננזלים יוניים עצמם יכולים להימצא במבנה של ננו-חלקיקים.¹⁵

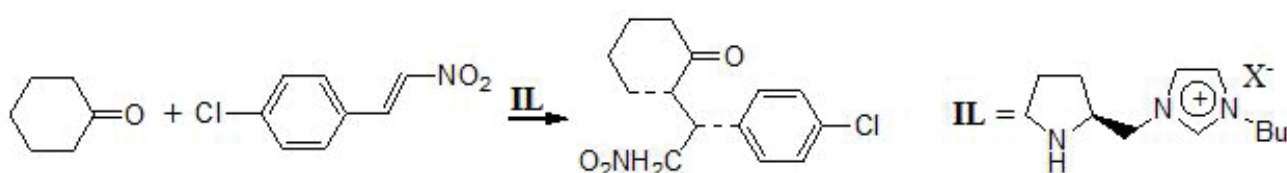
הקוטביות הגדולה של הננזלים היוניים גורמת לכך שהם יוצרים סולבציה חזקה מאוד סביב חלקיקי המומס, ובכך הם מונעים מהם ליצור מבנים גדולים מאוד בדומה למצב בתגובות רגילות.¹⁶ החוקרים מדווחים כי כאשר סנתזו ננו-חלקיקי סיליקה (SiO₂) בממסים שונים, התקבלו התוצאות הבאות: במים לא נוצרו ננו-חלקיקים אלא משקע רגיל; באתנול היה קוטר החלקיקים (ללא מעטפת הסולבציה) קרוב ל-54nm ואילו ב-BMIM-BF₄ קוטרם היה קרוב ל-5nm.



איור 10



איור 11



איור 12

כאשר השתמשו בממסים אורגניים מקובלים ובנוזל יוני, הייתה האנטיסלקטיביות של התגובה כפי שרואים בטבלה 2.

ז. רעילות של נוזלים יוניים: החיסרון הגדול

כבר בתחילת הדרך של הכנסת הנוזלים היוניים לשגרת עבודה קבועה, התברר שהם רעילים במידה זו או אחרת, ולחלקם רעילות גבוהה מאוד. עד לשנת 2010 הצטבר מידע רב על הרעילות של נוזלים יוניים במאגרי מים, ביבשה, לבעלי חיים, הערכות לגבי רעילות לבני אדם, השפעת הקטיון על הרעילות, השפעת האניון על הרעילות והשפעת נוכחות אטומים שונים (כמו חמצן) על מידת הרעילות של נוזלים יוניים. התמונה שהצטיירה הייתה עגומה בהחלט לפי מאמר הסקירה R. Frade & C. Afonso.²⁷ וחלק מהחוקרים אף ניסו להראות ש"השד לא נרא מהיר, וחלק מהחוקרים אף ניסו להראות ש"השד לא נרא כל-כך" כפי שעשה M. El-Harbawi מסעודיה.²⁸ הוא טען שבמקרה של נוזלים יוניים על בסיס MIM כמו BMIM שראינו כמה פעמים במאמר זה, ובמיוחד אם האניון הוא מימן-גופרתי, HSO_4^- הרעילות נמוכה. הוא בדק את הרעילות של נוזלים יוניים אחדים לגבי שני מינים של דגי ים. אבל אפילו במחקר הזה הוא מראה כי כאשר ריכוז BMIM-HSO_4 היה 200ppm, הייתה התמותה 50% ובריכוז 350ppm הייתה התמותה 100%.

קבוצת חוקרים מפולין בדקה שני משתנים של רעילות נוזלים יוניים: סוג האניון (כאשר הקטיון הוא BMIM) ורעילות לגבי שני צמחים: שעורה (*Hordeum vulgare* L.) וצנון (*Raphanus sativus*).²⁹ הם גילו כי האניון די-מתיל-פוספט, $\text{Dimethyl phosphate } (\text{CH}_3\text{O})_2\text{P}(\text{O})\text{O}^-$, הוא הרעיל ביותר ואילו יון הטוזילאט, $\text{Tosylate } \text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3^-$, הוא בעל הרעילות הנמוכה ביותר. לגבי הצמחים, זרעי שעורה רגישים יותר מזרעי צנון, והוספת נוזלים יוניים עד ריכוז של 1000ppm לכל קילוגרם קרקע, לא השפיעה על הצמיחה של הנבטים הצעירים של שני הצמחים.

M. Bubalo ושותפיה מקרואטיה סקרו את הידע שהצטבר אודות הרעילות של נוזלים יוניים עד 2014.³⁰ מהסקירה שלהם עולים שני חידושים משמעותיים ביותר לעומת סקירות קודמות. החידוש הראשון הוא בזה שהמאמר כולל סקירה של הרעילות בשלבי הסינתזה ולא רק של התוצר הסופי. הם מראים כי הסינתזה של רוב הנוזלים היוניים משתמשת בחומרים ובשיטות שאינן ידידותיות לסביבה

קוטל עשבים שוטים.²² המבנה של אחד מקוטלי עשבים אלה שסונטז בניצולת של 99% ונמצא כנוזל חסר-צבע, מראה כי היון החיובי הוא לא אחר מאשר BMIM שהוא מבנה פשוט יחסית, אלא שהיון השלילי הוא בעל המבנה המורכב יותר וכולל קבוצות פונקציונליות רבות (ראו איור 9).

1. סינתזה של נוזלים יוניים ותפקידם בסינתזה אורגנית

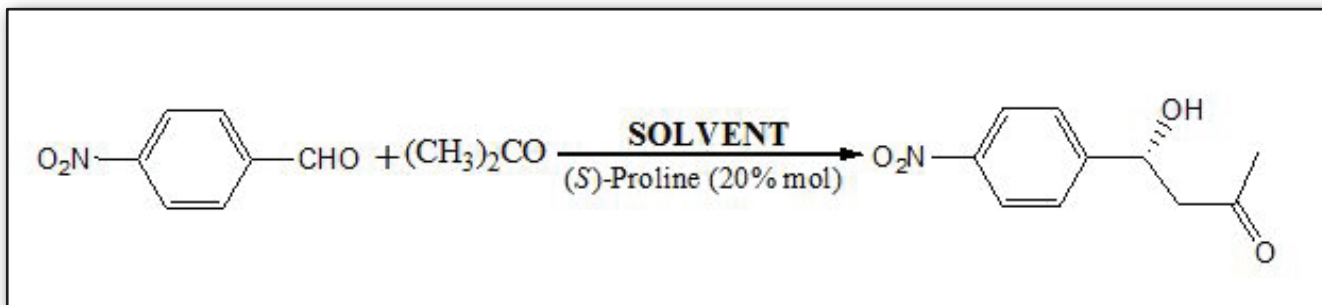
באופן כללי ניתן לומר שקיימות שלוש שיטות עיקריות לסינתזה של נוזלים יוניים (מופיעות באיור 10):²³

5. מתילציה של אמידזול בעזרת די-מתיל-קרבונט (Dimethyl carbonate, DMC).
6. סינתזה של נוזלים יוניים פירליים: העיקרון הכללי המנחה סינתזה זו היא תגובה בין נגזרת פעילה של אימידזול עם אמין פירלי ויצירה רב-שלבית של הנוזל היוני הפירלי. חשוב לציין כי הפירליות של התוצר נובעת מכך שהמרכז הפירלי של האמין איננו משתתף בתגובה.
7. סינתזה בעזרת גלי מיקרו: כאשר אורך גל הקרינה שיוכלה לקטל תגובה זו ידוע, זו השיטה הקלה ביותר.

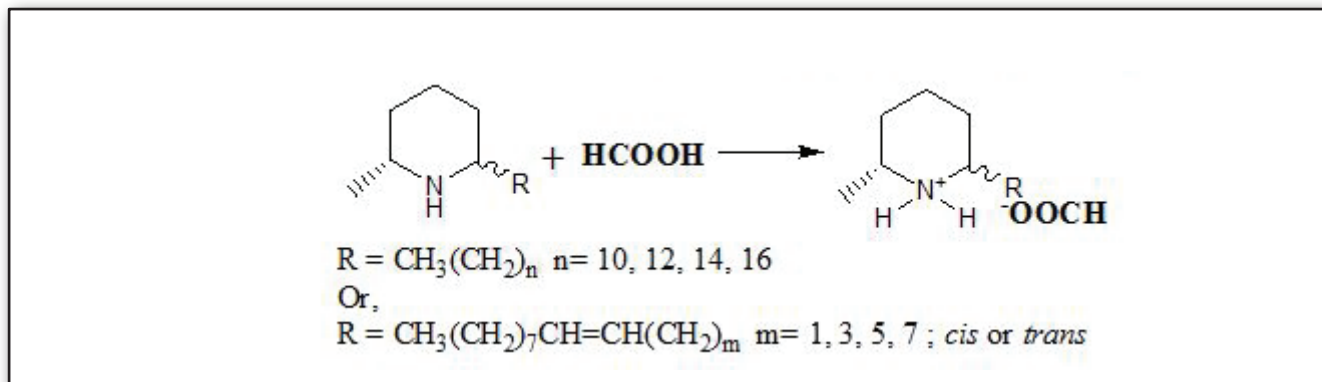
התפקידים של נוזלים יוניים בסינתזה אורגנית הולכים ומתגברים מיום ליום. תמונת המצב הנוכחית היא שנוזלים אלה נמצאים כמעט בכל תחומי הסינתזה האורגנית. אפשר לראות לקט נבחר ומייצג של תפקידים אלה במאמר הסקירה המצוין של R. Ratti, שתגובות נבחרות ממנו נביא באיור 11.²⁴ לא נפרט כאן לגבי כל סינתזה מהו הנוזל היוני (IL) ששימש בה. הקוראים המעוניינים ימצאו זאת במאמר עצמו (גישה פתוחה, Open Access ללא תשלום).

אחד ההיבטים המעניינים ביותר של קטליזה בעזרת נוזלים יוניים היא סינתזות אנטיסלקטיביות (Enantioselective). אלה סינתזות שנותנות אנטיומר אחד כתוצר יחיד או כתוצר עיקרי. זה תחום שנחשב לכימיה משובחת ביותר. כדי שהדבר יתרחש, הנוזל היוני עצמו חייב להיות אנטיומר נקי. ניקח דוגמה מעבודה מוקדמת של Z. Dabrowski ושותפיו (ראו איור 12).²⁵

וכדי להדגים זאת בתגובה הידועה לכולנו מלימודי התואר הראשון, ניעזר בעבודתם של L. Gonzalez ושותפיה שהדגימו זאת בדחיסה אלדולית (ראו איור 13).²⁶



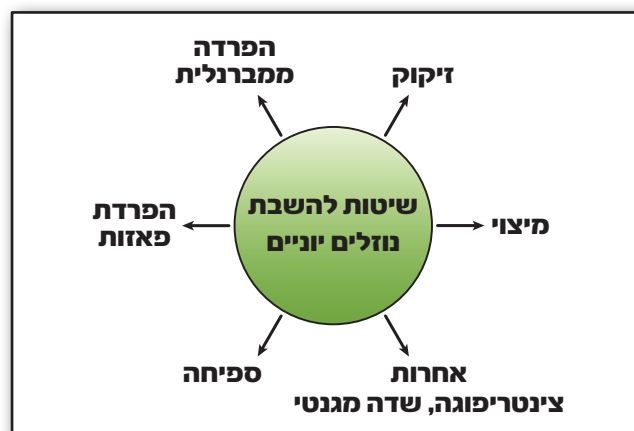
איור 13



איור 14

טבלה 2: אננטיוסלקטיביות של דחיסה אלדולית בממסים שונים (לפי Gonzalez et al., 2014)

ניסוי	ממס	סלקטיביות (%)
1	Tolune	89
2	DMSO	90
3	BMIM-N(O ₂ SCF ₃) ₂	99



איור 15

פן נוסף של הנזק העצום שחלק מהנוזלים היוניים יכולים לגרום, נוגע לאחת הבעיות הקשות ביותר שהמדע בימינו מנסה להתמודד עמה: התפתחות חיידקים עמידים לאנטיביוטיקה. התפתחות זו, לפי תחזיותיהם של חלק מהמדענים, עלולה למוטט את המין האנושי אם לא ימצא פתרון ראוי לה. והנה, מחקר סיני מדווח כי BMIM-PF₆, אחד הנוזלים היוניים הוותיקים ביותר, מסייע להפצת גנים של עמידות בפני אנטיביוטיקה.³¹ קבוצת חוקרים נוספת מסין

ולאדם. החידוש השני הוא בשאלה אם ניתן לתכנן נוזלים יוניים, על פי הקבוצות הפונקציונליות השונות, תת-היחידות של המבנים השונים שלהם ועל סמך מחקרי יחס-מבנה-פעילות (SAR, Structure Activity Relationship); האם על סמך כל אלה ניתן לתכנן נוזלים יוניים רעילים פחות וידידותיים יותר לסביבה ולאדם. לגבי החלק השני, שכמובן קשור בקשר הדוק לחלק הראשון - התשובה שלהם איננה חד-משמעית.

שהוא בסיס, ע"י הפרשת חומצה פורמית, הלא היא חומצת הנמלים המפורסמת, וכך נוצר הנוזל היוני (ראו איור 14).

הערות ומקורות

להערות, הצעות ובקשות למתן הרצאות (ללא תשלום) בבתייה"ס, abedazab@gmail.com

(A) חלק מהממסים האורגניים "הרגילים" כוללים מטענים חלקיים גדולים יחסית (קיטוב) הנובע מרזוננס אלקטרוני שגורם לנקודות רתיחה גבוהות יחסית. למשל: DMSO, 189°C; DMF, 153°C; DMA, 165°C.

(B) נקודה-קוונטית (Quantum Dot) היא ננו-חלקיק שהוא חצי מוליך, פולט אור. מומלץ לקרוא המתעניין לקרוא את הערך בוויקיפדיה. זהו תחום מתפתח בקצב מהיר מאוד וכבר יש לו יישומים רבים בפיזיקה תיאורטית ויישומית, LED, הדמיה רפואית ואנרגיה ירוקה-ומתחדשת.

(C) ביופילם (Biofilm) היא מושבה (הצטברות) של חיידקים כקבוצה על משטח מסויים. ביופילמים מהווים בעיה בריאותית קשה כאשר מדובר בצנרת או מאגרי מים ובמיכלי איחסון של חומרי מזון.

(D) כדי להדגים לתלמידים מהו נוזל יוני, אפשר להשתמש במידע המופיע במקור³⁴ ולסנטז נוזל לא-רעיל כזה בביה"ס.

1. מאגר הנתונים של אוניברסיטת סטאנפורד. לרשום בגוגל: Stanford 04_02_85.pdf

2. http://www.rsc.org/education/eic/issues/2005_Jan/salty.asp

3. Dupont, J., et al.; Org. Synth.; 79; 2002; 236-41

4. Atefi, F., et al.; Green Chem.; 11(10); 2009; 1595-604

5. Plechkova, N., Seddon, K.; Chem. Soc. Rev.; 37(1); 2008; 123-50

מדווחת כי נוזלים יוניים מקבוצת OMIM-X (O הוא קיצור של אוקטיל, $n-C_8H_{17}$, במקום הבוטיל שיש ב-BMIM) לא רק שהראו רעילות ועיכוב נביטה של נבטי פול (Vicia faba), אלא שהם גרמו לנזק חמצוני ל-DNA בתאי נבטים אלה.³² הרעילות התרחשה אפילו בריכוז של 50mg לקילוגרם קרקע. סדר הרעילות לפי האניונים היה: $BF_4^- > Br^- > Cl^-$.

ח. ואף על פי כן: תקווה

כדי לרתום את הנוזלים היוניים לעבודה משמעותית בתחומי המדע (כימיה, רפואה, סביבה), התעשייה ועוד, הושקע מחקר גדול בשנים האחרונות כדי להפוך את תהליכי הסינתזה שלהם לזולים, ידידותיים לסביבה ולא עד כדי כך רעילים. אחד המאמרים שסקר עניין זה כבר צוטט קודם (מקור 30). מאמר נוסף שעוסק בשיטות ובטכנולוגיות השונות להשבה של נוזלים יוניים אחרי שימוש, מסכם שיטות אלה באיור 15.³³ מאמר אחר המביא מעט תקווה בנוגע לעתיד השימוש הבטוח בנוזלים יוניים פורסם ע"י קבוצה סינית נוספת והוא עסק בשני היבטים.³⁴

א. אפשרות הפירוק הביולוגי של נוזלים יוניים (Biodegradability) ע"י חיידקים. מסתבר שקבוצת הנוזלים היוניים שהמבנים שלהם כוללים כולין (Choline) בתפקיד הקטיון ואניון של חומצה אמינית, ניתנים בקלות לפירוק ביולוגי ע"י חיידקים שונים. למשל, $HOCH_2CH_2N^+(CH_3)_3OOCCH(NH_2)(CH_3)_2$ שהוא מלח של כולין וואלין.

ב. נוזלים יוניים מקבוצה זו הם בעלי רעילות נמוכה מאוד או אינם רעילים כלל. חסרונם של נוזלים יוניים אלה הוא ביציבותם הנמוכה.

ט. נוזלים יוניים טבעיים!?

כן! קבוצת חוקרים בינלאומית פרסמה מחקר אודות גילוי נוזלים יוניים טבעיים. ולפני שנציג את המבנים של נוזלים אלה ודרך היווצרותם, אפשר להזדהות עם הקביעה של המחברים כי לאור היישומים הרבים של נוזלים יוניים, הדבר נראה מוזר שחומרים מסוג זה לא התגלו עד אותו מחקר בטבע.³⁵ החוקרים גילו כי נמלים מסוג *Solenopsis invicta* מפרישות אלקלואידים רעילים כחלק ממנגנון ההגנה (והתקיפה) שלה. בזמן העימות עם סוג נמלים נוסף (שני המינים חיים ביערות אמריקה הדרומית), נמלים מסוג *Nylanderia fulva* מנטרלות את הרעל

21. Pendleton, J., Gilmore, B.; *Int. J. Antimicrob. Ag.*; 46(2); 2015; 131-39
22. Pernak, J., et al.; *J. Agric. Food Chem.*; 63(13); 2015; 3357-66
23. Jindal, R., Sablok, A.; *Curr. Green Chem.*; 2(2); 2015; 135-155
24. Ratti, R.; *Adv. Chem.*; 2014; Article ID 729842; 1-17
25. Dabrowski, Z., et al.; *Polimery*; 57(5); 2012; 375-81
26. Gonzalez, L., et al.; *Eur. J. Org. Chem.*; 2014(24); 5356-63
27. Fradi, R., Afonso, C.; *Hum. Exp. Toxicol.*; 29(12); 2010; 1038-54
28. El-Harbawi, M.; *Procedia Chem.*; 9; 2014; 40-52
29. Biczak, R., et al.; *J. Hazard. Mater.*; 274(15); 2014; 181-90
30. Bubalo, M., et al.; *Ecotox. Environ. Safe.*; 99; 2014; 1-12
31. Luo, Y., et al.; *Environ. Sci. Technol. Lett.*; 1(5); 2014; 266-70
32. Lio, T., et al.; *Sci. Rep.*; 5 (Article number 18444); 2015; 1-10
33. Mai, N., et al.; *Process Biochem.*; 49; 2014; 872-81
34. Hou, X.-D., et al.; *PLOS ONE*; 8(3); 2013; e59145(1-7)
35. Chen, L., et al.; *Angew. Chem.*; 126(44); 2014; 11956-9
6. Khupse, N., Kumar, A.; *Indian J. Chem.*; 49A(05-06); 2010; 635-48
7. Sha, O., et al.; *J. Anal. Methods Chem.*; 2014; Article ID 964273; 1-8
8. Weatherly, C., et al.; *J. Agric. Food Chem.*; 64(6); 2016; 1422-32
9. Zhu, H.-B., et al.; *Chin. Chem. Lett.*; 25(3); 2014; 465-8
10. Castner, E., et al.; *Annu. Rev. Phys. Chem.*; 62; 2011; 85-105
11. Li, L., et al.; *Int. J. Biol. Macromolec.*; 66; 2014; 172-8
12. Andreani, L., Rocha, J.; *Bras. J. Chem. Eng.*; 29(1); 2012; 1-13
13. Dharaskar, A.; *Res. J. Chem. Sci.*; 2(8); 2012; 80-5
14. Chen, X., et al.; *Energy Fuels*; 29(5); 2015; 2998-3003
15. Hayes, R., et al.; *Chem. Rev.*; 115(13); 2015; 6357-426
16. Gao, J., et al.; *ACS NANO*; 9(3); 2015; 3243-53
17. Ayi, A., et al.; *J. Mater.*; 2015; Article ID 372716; 1-8
18. Ravishankar, A., et al.; *J. Exp. Nanosci.*; 10(18); 2015; 1358-73
19. Xia, J., et al.; *App. Catal. B*; 181; 2016; 260-9
20. Smiglak, M., et al.; *Chem. Commun.*; 50(66); 2014; 9228-50