

ผลการใช้สารยับยั้งยูเรียเอสที่มีต่อการสูญเสียแอมโมเนียและประสิทธิภาพ ของปุ๋ยยูเรียเมื่อหว่านในนาข้าว

Effect of Urease Inhibitors on Ammonia Loss and Efficiency of Broadcast Urea in Lowland Rice Field

สาคร ผ่องพันธุ์¹ พรพิมล ชัยวรรณคุปต์¹ เจนวิทย์ สุขทองสา²
Sakorn Phongpan¹ Pornpimol Chaiwanakupt¹ Jenvith Sookthongsa²

ABSTRACT

An experiment was conducted at the Suphanburi Rice Experiment Station on a Phimai soil (Vertic Tropaquepts) in the 1993 dry season to test the effects of two urease inhibitors, cyclohexylphosphorictriamide (CHPT) and N-(n-butyl) phosphorictriamide [(NBPT(O))] applied at the rate of 1% of the weight of urea either alone or in combination with algicides (copper sulfate + terbutryn) and a nitrification inhibitor (phenylacetylene) on ammonia (NH₃) loss and efficiency of urea broadcast to lowland rice var. Suphanburi 90 at the rate of 9.6 kg N per rai.

The results showed that the addition of algicide reduced the growth of algae and maintained the pH of the floodwater below that of the control for 11 days following urea application. The two urease inhibitors markedly reduced urea hydrolysis and CHPT was more effective than NBPT(O). Addition of CHPT maintained the ammoniacal N concentration of the floodwater below 2 g m⁻³ for 11 days and resulted in reducing NH₃ loss by ~ 90%. Application of NBPT(O) and CHPT with urea did not result in a significant increase in grain yield of the urea applied alone (502.4 kg/rai). However, the addition of each urease inhibitor with algicide or algicide + nitrification inhibitor significantly increased grain yield (p < 0.05). The ¹⁵N balance measurement in the soil – plant system at crop harvest showed that NBPT(O) + algicide and NBPT(O) + algicide+ nitrification inhibitor treatments doubled the recovery of applied N in the grain, while the corresponding CHPT treatments increased the recovery three fold. The recovery of applied N in the whole plant followed the similar trend of those found in the grain.

Key words : cyclohexylphosphorictriamide, phenylacetylene, N-(n-butyl) phosphorictriamide, urea, NH₃ volatilization, flooded rice field

¹ กลุ่มงานวิจัยนิวเคลียร์เทคนิคการเกษตร กองเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร
Nuclear Research in Agriculture Group, Agricultural Chemistry Division, Department of Agriculture

² สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร
Suphanburi Rice Experiment Station, Rice Research Institute, Department of Agriculture

บทคัดย่อ

ได้ดำเนินการทดลอง ณ สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี (ชุดดินพินาย : Vertic Tropaquepts) ในฤดูนาปรัง ปี 2536 เพื่อทดสอบผลของสารยับยั้งยูรีเอส 2 ชนิด คือ cyclohexylphosphorictriamide (CHPT) และ N-(n-butyl) phosphoric triamide (NBPTO) ในอัตรา 1% ของน้ำหนักยูเรีย เมื่อใส่เพียงอย่างเดียวหรือใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย (copper sulfate + terbutryn) และสารยับยั้งไนโตรฟิเคชัน (phenylacetylene) ที่มีต่อการสูญเสียแอมโมเนียและประสิทธิภาพของปุ๋ยยูเรียเมื่อหว่านให้แก่ต้นข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ในอัตรา 9.6 กก. ไนโตรเจนต่อไร่

ผลการทดลองพบว่า การใส่สารกำจัดสาหร่ายร่วมกับยูเรียสามารถลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่อาศัยอยู่ในนา และรักษาระดับ pH ของน้ำที่ท่วมขังดินให้ต่ำกว่าค่ารับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวเป็นระยะเวลานานถึง 11 วันภายหลังการใส่ยูเรีย สารยับยั้งยูรีเอสทั้งสองชนิดลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรียได้อย่างเด่นชัด และ CHPT มีประสิทธิภาพดีกว่า NBPT(O) โดยการใส่ CHPT สามารถรักษาระดับปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal -N อยู่ต่ำกว่า 2 gm^{-3} เป็นระยะเวลานานถึง 11 วัน ซึ่งมีผลลดการสูญเสียแอมโมเนียประมาณ 90 % การใส่ NBPT(O) หรือ CHPT ร่วมกับยูเรียให้ผลผลิตข้าวไม่แตกต่างจากค่ารับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว (502.4 กก./ไร่) แต่เมื่อใส่สารยับยั้งยูรีเอสแต่ละชนิดร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายหรือสารกำจัดสาหร่าย + สารยับยั้งไนโตรฟิเคชัน พบว่า ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในการวัดความสมดุล ไนโตรเจน 15 ในระบบดินและพืชตอนระยะเก็บเกี่ยวพบว่า NBPT(O) เมื่อใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย และ NBPT(O) + สารกำจัดสาหร่าย + สารยับยั้งไนโตรฟิเคชัน ให้ปริมาณการตรวจพบไนโตรเจน 15 (% ของไนโตรเจนที่ใส่ลงไป) ในเมล็ดเป็น 2 เท่าของปริมาณการตรวจพบในค่ารับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ CHPT เมื่อปฏิบัติอย่างเดียวกันให้ปริมาณการตรวจพบไนโตรเจน 15 สูงเป็น 3 เท่า ปริมาณการตรวจพบไนโตรเจน 15 ในต้นพืชทั้งหมดมีรูปแบบคล้ายคลึงกับที่ตรวจพบในเมล็ด

คำหลัก : Cyclohexylphosphorictriamide, phenylacetylene, N-(n-butyl) phosphorictriamide, ยูเรีย, การระเหยของแอมโมเนีย นาข้าว

คำนำ

ยูเรียเป็นปุ๋ยไนโตรเจนที่สำคัญสำหรับข้าวนาลุ่มสภาพน้ำขังในเอเชีย (Stangel and Harris, 1987) แต่ไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (De Datta, 1987 ; Vlek and Byrnes, 1986) เหตุผลสำหรับสาเหตุสำคัญที่ลดประสิทธิภาพของยูเรียเนื่องจากเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในปริมาณที่สูงในดินนาสภาพน้ำขังโดยกระบวนการระเหยของแอมโมเนีย (NH_3 volatilization) และ denitrification (Cai *et al.*, 1986 ; Vlek and Byrnes, 1986 ; Simpson *et al.*, 1984 ; Zhu *et al.*, 1989) การสูญเสียไนโตรเจนในปริมาณที่สูงโดยกระบวนการระเหยของแอมโมเนียเกิดขึ้นเนื่องจาก ยูเรียเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยกิจกรรมของเอนไซม์ ยูรีเอส (urease) ในดินชักนำให้เกิดการสะสมความเข้มข้นของ ammoniacal -N ($\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$) ในปริมาณที่สูงในน้ำที่ท่วมขังดินภายหลังการใส่ปุ๋ยของพื้นแบบหว่านในน้ำท่วมขังดิน หรือการคราดกลบ ปุ๋ยยูเรียลงลึกได้ผิวดินไม่สามารถปฏิบัติได้ (Cao *et al.*, 1984 ; Craswell *et al.*, 1981 ; Fillery *et al.*, 1984 ; Freney *et al.*, 1990) ความเข้มข้นของ ammoniacal N ที่สูงขึ้นควบคู่กับการเพิ่มขึ้นของ pH ในน้ำที่ท่วมขังดินในช่วงเวลาตอนกลางวันมีผลชักนำ และส่งเสริมให้การระเหยของแอมโมเนีย เพิ่มขึ้นอีกด้วย (Fillery and Vlek, 1986 ; Freney and Denmead, 1992) การลดการสูญเสียไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรียโดยกระบวนการนี้จำเป็นต้องหาวิธีการปฏิบัติที่เหมาะสม ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของ ammoniacal N ในน้ำที่ท่วมขังดินภายหลังการใส่ปุ๋ยให้อยู่ในปริมาณที่ต่ำ

แนวทางที่เป็นไปได้อันหนึ่งในการลดปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal N และการระเหยของแอมโมเนียคือการใช้สารประกอบทางเคมีที่ยังกิจกรรมยูรีเอสที่ผิวดินเพื่อเปิดโอกาสให้ยูเรียเคลื่อนย้ายลงลึกในชั้นดินก่อนที่จะถูกไฮโดรไลซ์ทำให้แอมโมเนียที่ปลดปล่อยออกมาถูกดูดยึดด้วย

ธาตุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (cation exchange complex) ในชั้นดินแนวทางดังกล่าวประสบความสำเร็จจากการทดลอง ทั้งในห้องปฏิบัติการและเรือนกระจก (Byrnes *et al.*, 1983 ; Cai *et al.*, 1989) กับสารประกอบ phenylphosphorodiamidate (PPD) และ N-(n-butyl)-thiophosphorictriamide (NBPT) ซึ่งเป็นสารยับยั้งยูรีเอสที่ได้พัฒนาขึ้นและประสบความสำเร็จที่สุดในขณะนั้น (Chai and Bremner, 1987 ; Beyrouthy *et al.*, 1988 ; Bremner and Chai, 1986 ; Bronson *et al.*, 1989 ; Schlegel *et al.*, 1986) อย่างไรก็ตามการทดลองในนาข้าว พบว่าการใส่สารยับยั้งยูรีเอสดังกล่าวมีโอกาสน้อยครั้งในการลดการสูญเสียแอมโมเนียหรือเพิ่มผลผลิตเมล็ด (Buresh *et al.*, 1988 a, b ; Fillery *et al.*, 1986 ; Phongpan and Byrnes, 1990) หลังจากนั้นได้มีการทดลองเพิ่มเติมและพบว่าสารประกอบ thiophosphorictriamides เช่น NBPT นั้นประสิทธิภาพในการยับยั้งกิจกรรมของยูรีเอสจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อตัวมันเองจำเป็นต้องเปลี่ยนกลายเป็น oxygen analog คือ N-(n-butyl) phosphorictriamide [NBPT(O)] ซึ่งเป็นสารยับยั้งยูรีเอสที่มีศักยภาพ (Byrnes and Christianson, 1988 ; Creason *et al.*, 1990 ; Mc Carty *et al.*, 1989) นอกจากนี้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า cyclohexylphosphorictriamide (CHPT) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งกิจกรรมของยูรีเอสได้ดีกว่า NBPT(O) (Christianson *et al.*, 1990 ; Keerthisinghe and Freney, 1994)

วัตถุประสงค์ของการทดลองครั้งนี้ เพื่อศึกษาผลการใช้สารยับยั้งยูรีเอส คือ NBPT(O) และ CHPT เมื่อใส่เพียงอย่างเดียวหรือใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันที่มีต่อการสูญเสียแอมโมเนียและประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ไนโตรเจนของปุ๋ยยูเรียเมื่อหว่านในนาข้าว

อุปกรณ์และวิธีการ

ได้ดำเนินการทดลองในฤดูนาปรัง พ.ศ. 2536 (มีนาคม - มิถุนายน ที่สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี (14°30' N และ 100°05' E) ในภาคกลางของประเทศไทย ดินที่ทดลองเกิดจากตะกอนของน้ำจืด (Fresh Water Alluvial soil) และจัดอยู่ในชุดพินาย (Vertic Tropaquepts) คุณสมบัติ

บางประการของดินดังกล่าวในระดับความลึกชั้นไทรพอดินนี้ คือ pH (1:1 ดิน:น้ำ) = 5.1, total N = 1.6 g kg⁻¹, อินทรีย์วัตถุ = 35 g kg⁻¹, cation exchange capacity = 28 c mol kg⁻¹, Bray II extractable P = 17 mg kg⁻¹, NH₄ OAc exchangeable K = 127 mg kg⁻¹.

ไถคราดเตรียมแปลงวงกลมจำนวน 1 แปลง โดยมีเส้นรัศมียาว 25 เมตร และคันดินล้อมรอบสูงประมาณ 0.2 เมตร เพื่อใช้วัดการระเหยของแอมโมเนียโดยตรงจากยูเรียที่หว่านลงในน้ำภายในแปลงวงกลม เตรียมแปลงย่อยขนาด 4 x 4 เมตร จำนวน 39 แปลง ให้มีคันสูง 0.2 เมตร และกว้าง 0.4 เมตร โดยใช้แผ่นพลาสติกสีดำฝังล้อมรอบด้านในของแปลง ลึกประมาณ 0.3 เมตร แปลงย่อยดังกล่าวได้กำหนด ให้ห่างจากแปลงวงกลมประมาณ 40 เมตร และอยู่ในทิศทางด้านเหนือลมของแปลงวงกลม จัดการทดลองแบบ randomized complete block ทำ 3 ซ้ำ ใส่ปุ๋ยรองพื้นคือ ทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (46% P₂O₅) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (60% K₂O) ในอัตรา 3.8 กก. ฟอสฟอรัสต่อไร่ และ 4.5 กก. โพแทสเซียมต่อไร่ ตามลำดับ โดยหว่านปุ๋ยไปบนผิวดิน ที่ได้ระบายน้ำออกจนเหลือน้อยที่สุด และไถคราดกลบให้ปุ๋ยจมฝังดิน แล้วทำการปักดำด้วยกล้าพันธุ์ข้าวสุพรรณบุรี 90 อายุประมาณ 3 สัปดาห์ โดยใช้ระยะปลูก 20x20 ซม. จำนวน 3 ต้นต่อจับ ในวันที่ 15 มีนาคม 2536 ภายหลังจากปักดำปรับระดับน้ำในแปลงวงกลมและแปลงย่อยให้อยู่ที่ประมาณ 5 ซม. และรักษาระดับดังกล่าวให้ใกล้เคียงกันตลอดช่วงการวัดและเก็บตัวอย่างน้ำในแปลง ดำรับ การทดลองประกอบด้วย Treatment combination ของสารยับยั้งยูรีเอส [NBPT(O), CHPT] ร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายไม่ใส่ copper Sulfate + terbutryn) และสารยับยั้งไนตริฟิเคชัน ไม่ใส่สารยับยั้งยูรีเอส (phenylacetyle : PA) โดยใส่ปุ๋ยยูเรียในทุก treatment combination ในที่นี้การใส่ปุ๋ยยูเรีย เพียงอย่างเดียวเป็นกรรมวิธีเปรียบเทียบ (Control) และเป็นกรรมวิธีที่ไม่ใส่ปุ๋ยยูเรียและสารใด ๆ รวมทั้งหมด 13 กรรมวิธี

ใส่สารยับยั้งยูรีเอส NBPT(O) และ CHPT (สังเคราะห์ขึ้นตามวิธีการของ Kole *et al.*, 1985) ในอัตรา 1% ของน้ำหนักยูเรียโดยละลายในน้ำแล้วฉีดไปบนผิวน้ำที่ท่วมขังดินในระหว่าง เวลา 15.00 ถึง 18.30 น. ของวันที่ 16 มีนาคม 2536 ใส่ phenylacetyle ในอัตรา

400 กรัมต่อไร่ ในตำรับที่ใส่สารกำจัดสาหร่ายใส่ copper sulfate ในอัตรา 800 กรัมต่อไร่ (Muirhead *et al.*, 1989) ในวันที่ 16 และ 23 มีนาคม 2536 เมื่อเวลา 17.00 น. สำหรับ terbutryn หรือ (2-(tert-butylamino)-4-(ethylamino)-6-(methylthio)-s-triazine) ใส่ในอัตรา 0.2 มก. Active ingredient ต่อไร่ 1 ลิตร (Bowmer and Muirhead, 1987) ในวันที่ 19 และ 25 มีนาคม 2536 ที่เวลา 17.00 น. ใส่ปุ๋ยยูเรีย (46% N) ในแปลงวงกลมเมื่อตอนเช้าของวันที่ 17 มีนาคม 2536 ในอัตรา 9.6 กก.ไนโตรเจนต่อไร่ ส่วนในแปลงย่อย ก็ใช้อัตราและวิธีการใส่ปุ๋ยยูเรียเช่นเดียวกับแปลงวงกลม สำหรับในแต่ละแปลงย่อย ใส่ปุ๋ยยูเรียไนโตรเจน 15 (5.27 atom% excess) ในอัตราเดียวกันลงใน microplot ที่ทำด้วยกรอบเหล็กกล้าชุบสังกะสี (galvanized steel) ขนาด 0.4 ม. x 0.4 ม. สูง 0.4 ม. ซึ่งฝังให้ลึกจมลงไปใต้ผิวดิน 0.25 ม.

ภายหลังการใส่ปุ๋ยยูเรียวัดอุณหภูมิและระดับความลึกของน้ำในแปลงย่อยและแปลงวงกลมทุก ๆ 2 ชั่วโมง ตั้งแต่ 08.00 ถึง 18.00 น. เป็นระยะเวลาติดต่อกันนาน 11 วัน โดยเริ่มต้นเมื่อเวลา 14.00 น. ของวันที่ 17 มีนาคม 2536 และสิ้นสุดเมื่อเวลา 14.00 น. ของวันที่ 27 มีนาคม 2536 ในเวลาเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ 5 จุด ภายในแต่ละแปลงนำไปวัด pH ทันทีด้วย glass electrode ตัวอย่างน้ำเดียวกันนั้นวัดหา ammoniacal-N ด้วย ammonia electrode และ millivolt meter (Orion, 1983) และ urea-N ตามวิธีการที่บรรยายโดย Mulvaney and Bremner (1979)

ในแปลงวงกลมวัด vertical flux density (F) ของแอมโมเนียและความเร็วลมที่พัดผ่านบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางวงกลมที่ระดับ 0.8 เมตรเหนือผิวน้ำในระหว่างเวลา 08.00-12.00 12.00-18.00 และ 18.00-08.00 น. โดยทำการดักจับแอมโมเนียที่ระเหยออกมาด้วย ammonia samplers (Leuning *et al.*, 1985) ตามวิธีการ simplified micrometeorological technique, (Denmead 1983 ; Freney *et al.*, 1985) ค่า flux ที่วัดได้พร้อมกับ ความเร็วลม (u) และ equilibrium ammonia concentration (po) ซึ่งคำนวณจาก pH อุณหภูมิและ ammoniacal - N ของน้ำที่ท่วมขังดิน) สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ $F = (k) (u) (po)$ ที่เรียกว่า Bulk aerodynamic $F = (k) (u) (po)$ relationship โดย $k =$ transfer coefficient (Freney

et al., 1985 ; De Datta *et al.*, 1989) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณการสูญเสียแอมโมเนีย ในแต่ละแปลงย่อยเมื่อทราบข้อมูล ความเร็วลม pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของ ammoniacal-N ในน้ำที่ท่วมขัง ในแปลงย่อย

เมื่อถึงระยะเมล็ดสุก เก็บตัวอย่างพืชและดินจากแต่ละแปลง microplot โดยตัดส่วนของต้นพืช ที่อยู่บริเวณเหนือดินแยกออกเป็นเมล็ดและฟางและนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C จนกระทั่งน้ำหนักแห้งคงตัวแล้วชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียด (<420 μ m) ภายหลังตัดต้นพืชแล้วทำการเก็บตัวอย่างดินภายใน microplot ในระดับความลึก 0.25 ม. นำมาฝังให้แห้งในที่ร่ม ชั่งน้ำหนักและบดให้มีขนาด 2 มม. ขณะเดียวกันแยกรากพืชออกจากดิน นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นให้ปราศจากดินก่อนทำการอบและบดให้ละเอียดเช่นเดียวกับเมล็ดและฟาง ตัวอย่างดินภายหลังแยกรากออกทำการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยทั่วแล้ว ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างส่วนหนึ่งมาบดให้ละเอียด (250 μ m) นำตัวอย่างพืชและดินมาวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี micro Kjeldahl (Bremner, 1965) และวิเคราะห์ 15 N โดยวิธี mass spectrometry ด้วยเครื่อง Isotope ratio mass spectrometer model 662 (VG Isogas, Middlewich, U.K.) ทำการเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดสุก เพื่อวัดผลผลิตโดยเก็บเกี่ยวในเนื้อที่ 6.4 เมตร² ในแต่ละแปลงย่อยนำมาวัด ฝัด อบ ลดความชื้น และปรับค่าผลผลิตเมล็ดที่ระดับความชื้น 14 %

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

pH ของน้ำท่วมขังดิน

ในแปลงทดลองที่ใส่ปุ๋ยยูเรียเพียงอย่างเดียว (Control) pH ของน้ำที่ท่วมขังดินแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลง pH ประจำวันสูงและต่ำในนาข้าว (diurnal cycling pattern) อันเป็นลักษณะเฉพาะอันหนึ่งของดินนาซึ่งเกิดจากกิจกรรมการสังเคราะห์แสงและการหายใจของสาหร่ายและพืชน้ำเล็ก ๆ ที่เจริญเติบโตอยู่ในน้ำ (Mikkelsen *et al.*, 1978) ค่าสูงสุดของ pH แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 8 ถึง 9.1 และค่าต่ำสุดของ pH อยู่ระหว่าง 7.3 ถึง 7.8 (Fig.1) การใส่สารกำจัดสาหร่าย (CuSO_4 + terbutryn) ร่วมกับปุ๋ยรักษา

ระดับค่า pH ของน้ำต่ำกว่าค่ารับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวอย่างเด่นชัด เป็นระยะเวลา 11 วัน ยกเว้นในวันที่ 3 ซึ่งความกว้างของการแกว่งลดลง ในการทดลองที่ผ่านมานี้ สถานการณ์ที่เหมือนกันนี้ พบว่าการใส่ terbutryn ในระยะเวลาหนึ่งให้ผลประสิทธิภาพต่ำกว่าการใส่ครั้งแรก การใส่สารกำจัดสาหร่ายดังกล่าวอย่างต่อเนื่องไม่สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างได้ผล ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสาหร่ายที่อาศัยอยู่ในน้ำสามารถปรับตัวให้มีความทนทานต่อสารกำจัดสาหร่าย (Chaiwanakupt *et al.*, 1996) ในการทดลองครั้งนี้ เราได้เปลี่ยนสารกำจัดสาหร่าย เมื่อประสิทธิภาพของสารกำจัดสาหร่ายที่ใส่ก่อนหน้าลดลง การใส่ CuSO_4 เมื่อเริ่มการทดลอง (วันที่ 0) สามารถรักษาระดับค่า pH ที่ต่ำเพียงชั่วระยะเวลาอันสั้นและ pH ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 3 การใส่ terbutryn ในตอนบ่ายของวันที่ 3 ลดค่า pH ของน้ำที่ท่วมขังจากจุดสูงสุดที่ 8.3 ลงมาที่ระดับ 7.6 และสามารถรักษาประสิทธิภาพได้นานแค่ วันที่ 7 หลังจากนั้นค่า pH เพิ่มขึ้น การใส่ครั้งที่สองของ terbutryn ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าการใส่ครั้งแรก (Fig. 1)

การใส่สารยับยั้งยูเรียคือ NBPT(O) และ CHPT ร่วมกับยูเรีย ไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำที่ท่วมขังดินไม่ว่าใส่เพียงอย่างเดียว หรือใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย (ข้อมูลไม่ได้แสดง) อย่างไรก็ตามการใส่ CHPT + สารกำจัดสาหร่ายสามารถลด pH ลงเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งถึงวันที่ 6 (Fig. 2) การใส่สารประกอบที่สามารถลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรีย คาดว่าสามารถลดค่า pH ของน้ำที่ท่วมขังดิน ทั้งนี้เป็นเพราะภายหลังปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรีย แอมโมเนีย จะถูกปลดปล่อยออกมาซึ่งมีคุณสมบัติ Buffering capacity ทำให้ pH ของน้ำที่ท่วมขังดินจะรักษาระดับประมาณ 8 (Vlek and Craswell, 1981) ผลดังกล่าวเคยปรากฏในการทดลอง ที่ผ่านมานี้ (Chaiwanakupt *et al.*, 1996; Phongpan *et al.*, 1995)

ยูเรีย-ไนโตรเจน

ในตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นของยูเรียในน้ำที่ท่วมขังดินลดลงอย่างรวดเร็ว ในวันแรกภายหลังการใส่ และไม่สามารถวัดปริมาณได้ในวันที่ 7 (Fig. 3a) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองอื่น ๆ

ในนาข้าวสภาพน้ำขัง (Cai *et al.*, 1989 ; Phongpan and Byrnes, 1990) การใส่ phenylacetylene (PA) เพียงอย่างเดียวไม่มีผลกระทบต่ออัตราการไม่ปรากฏตัวของยูเรีย (ข้อมูลไม่ได้แสดง) การใส่สารประกอบ NBPT(O) และ CHPT ลดอัตราการไม่ปรากฏตัวของยูเรียและเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 11) ปริมาณส่วนหนึ่งของยูเรีย ยังเหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดิน การใส่สารกำจัดสาหร่ายลดอัตราการไม่ปรากฏตัวของยูเรียได้ช้ากว่าตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว (Fig. 3b) เมื่อวันที่ 11 พบว่ามียูเรียเหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดิน 8 gm^{-3} ส่วนการใส่สารกำจัดสาหร่ายร่วมกับ NBPT(O) เพิ่มปริมาณของยูเรียที่เหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดิน 40 gm^{-3} เมื่อวันที่ 11 (Fig. 3b) CHPT เมื่อใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการรักษาปริมาณยูเรียให้เหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดินได้ดีกว่า NBPT(O) เมื่อปฏิบัติอย่างเดียวกัน โดยวันที่ 11 ปริมาณที่มากกว่า 50% ของยูเรียที่ใส่ลงไปเหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดิน ของตำรับ CHPT + สารกำจัดสาหร่าย เนื่องจากยูเรียสามารถสูญหายไปจากน้ำที่ท่วมขังดินโดยอาจถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยเอนไซม์ยูเรียเอส โดยบางส่วนอาจถูกต้นข้าว วัชพืช และสาหร่ายสามารถดูดกินยูเรียโดยตรง รวมทั้งถูกจุลินทรีย์ดินนำไปใช้ (microbial immobilization) และเคลื่อนย้ายลงไปในชั้นใต้ดิน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะประเมินประสิทธิภาพของ NBPT(O) และ CHPT ในฐานะของสารยับยั้งยูเรียเอสโดยพิจารณาจากปริมาณความเข้มข้นของยูเรียที่เหลืออยู่ในน้ำที่ขังดินแต่เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใส่ CuSO_4 และ terbutryn สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณยูเรียที่ถูกสาหร่ายดูดกินลดน้อยลง และเหลืออยู่ในน้ำที่ขังดินเพิ่มขึ้น การใส่ NBPT(O) และ (CHPT) ช่วยลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรียโดย CHPT ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

การใส่สารกำจัดสาหร่ายและ phenylacetylene (PA) ร่วมกับยูเรียให้ผลแตกต่างกับการใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวต่อการสะสมปริมาณ ammoniacal-N (AN) ในน้ำที่ขังดิน (Fig. 4) ในตำรับการทดลองเหล่านี้ปริมาณ AN เกิดขึ้นในน้ำที่ท่วมขังดินภายหลังการใส่ยูเรีย และโดย

ทั่วไป เพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดในวันที่ 4 ในตำรับที่ใส่ยูเรีย เพียงอย่างเดียวความเข้มข้นของ AN เพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ 12 g m^{-3} แล้วลดลงและไม่สามารถวัดปริมาณได้ภายในวันที่ 10 (Fig. 4) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Chaiwanakupt *et al.* (1996) ความเข้มข้นของ AN แปรเปลี่ยนไปตามช่วงระยะเวลาประจำวันโดยเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางคืน และลดลงในระหว่างช่วงเวลากลางวัน การลดลงของปริมาณ AN เป็นไปในทางเดียวกับช่วงเวลาของการเกิดการสูญเสียแอมโมเนียสูงสุด การใส่สารกำจัดสาหร่ายร่วมกับยูเรียเพิ่มความเข้มข้นของ AN มากกว่าตำรับที่ใส่ยูเรียแต่เพียงอย่างเดียว ส่วนความเข้มข้นของ AN ในตำรับที่ใส่ PA ร่วมกับยูเรียอยู่ในระดับใกล้เคียงกับตำรับที่ใส่ยูเรียจนกระทั่งถึงวันที่ 3 หลังจากเวลาดังกล่าวปริมาณ AN ในตำรับที่ใส่ PA ร่วมกับยูเรียลดลงได้เร็วกว่าตำรับที่ใส่ยูเรียอย่างเดียว ตำรับที่ใส่ยูเรียร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย + PA มีผลทำให้ปริมาณ AN เกิดขึ้นสูงสุด ($\sim 17 \text{ g m}^{-3}$) และมีปริมาณ AN เหลืออยู่พอสมควรในน้ำที่ท่วมขังดินเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในวันที่ 11 (Fig. 4) โดยทั่วไปความเข้มข้นของ AN ในตำรับที่ใส่ยูเรีย + สารกำจัดสาหร่ายและสารกำจัดสาหร่าย + PA ไม่แสดงรูปแบบของการแปรเปลี่ยนตามช่วงระยะเวลาประจำวันเหมือนกับตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวและยูเรีย + PA อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของ AN ในตำรับการทดลองดังกล่าวลดลงอย่างเด่นชัดในระหว่างช่วงเวลาดอนบ่ายระหว่างวันที่ 3 และ 4 การลดลงสอดคล้องกับการลดลงของประสิทธิภาพสารกำจัดสาหร่ายพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ pH น้ำที่ท่วมขังดินซึ่งชี้ให้เห็นว่าแอมโมเนียเกิดการสูญเสียจากน้ำท่วมขังดินในอัตราที่เร็วกว่าในวันดังกล่าว ผลการทดลองที่ผ่านมาระบุว่าตำรับที่ใส่สารกำจัดสาหร่ายควรลดการ สูญเสียแอมโมเนีย (Bowmer and Muirhead, 1987 ; Muirhead *et al.*, 1989) และตำรับที่ใส่ PA ควรยับยั้งกระบวนการ nitrification (Mc Carty and Bremner, 1986) และเมื่อรวมตำรับทั้งสองเข้าด้วยกันจึงควรยับยั้งกระบวนการทั้งสอง การยับยั้งกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งเพียง อย่างเดียว เช่น ในไตรฟิเคชัน อาจมีผลต่อการเพิ่มอัตราการสูญเสียโดยการระเหยของแอมโมเนียและมีผลทำให้ AN หายไปจากน้ำที่ท่วมขังดินเร็วขึ้น (Rodger, 1983).

การใส่ NBPT(O) และ CHPT ไม่ว่าจะร่วมหรือไม่ ร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายและ PA มีผลในการลดลงอย่างมากของ AN ในน้ำที่ท่วมขังดิน (Fig. 5,6) แต่เมื่อใส่สารกำจัดสาหร่าย และ PA เพื่อยับยั้งการระเหยของแอมโมเนียและไนตริฟิเคชันให้ค่า AN สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่า NBPT(O) และ CHPT ไม่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรียได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามค่าที่ต่ำของ AN ในตำรับที่ใส่ CHPT + สารกำจัดสาหร่าย + PA ($< 2 \text{ g N m}^{-3}$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากตำรับที่ใส่สารกำจัดสาหร่าย + PA ($\sim 17 \text{ g m}^{-3}$) แสดงให้เห็นว่า CHPT เป็นสารยับยั้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การระเหยของแอมโมเนีย

การระเหยของแอมโมเนียจากดินนาถูกควบคุมโดย AN, pH และอุณหภูมิของน้ำขังดินและความเร็วลม (Freney and Denmead, 1992) ปริมาณความเข้มข้นของ AN ในตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 12 g m^{-3} อุณหภูมิน้ำแปรเปลี่ยนระหว่าง $25\text{--}39^{\circ}\text{C}$ ค่า pH อยู่ระหว่าง 7.2 ถึง 9.2 และความเร็วลมอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 3 m s^{-1} ปัจจัยดังกล่าวเมื่อนำมาคำนวณการสูญเสียแอมโมเนียจากตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวได้เท่ากับ 14.5% ของปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ รูปแบบของการสูญเสียแอมโมเนียของการทดลองครั้งนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับงานทดลอง ที่ผ่านมา (Zhu *et al.*, 1989 ; Chaiwanakupt *et al.*, 1996). การสูญเสียแอมโมเนียในวันแรกภายหลังการใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว เกิดขึ้นในปริมาณที่ต่ำหลังจากนั้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดในวันที่ 3 และลดลงหลังจากนั้นไปจนกระทั่งวัดปริมาณไม่ได้ในวันที่ 11 (Fig.7) เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวการใส่สารกำจัดสาหร่ายช่วยลดการสูญเสียแอมโมเนียจากปุ๋ยยูเรียเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (11.8%) ในขณะที่การใส่สารยับยั้งไนตริฟิเคชันคือ PA ให้ผลใกล้เคียงกันในการลดการสูญเสียแอมโมเนีย (12.2) จากปุ๋ยยูเรีย (Table 1) การใส่สารกำจัดสาหร่ายและ PA ร่วมกันไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อปริมาณการสูญเสียแอมโมเนีย ในขณะที่การใส่ NBPT(O) หรือ CHPT ไม่ว่าจะเพียงอย่างเดียวหรือใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย

และ PA สามารถลดการสูญเสียแอมโมเนียอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยการสูญเสียแอมโมเนียเกิดขึ้นต่ำสุดในตำรับที่ใส่ CHPT (1.1–2.4%)

ไนโตรเจน-15 ในระบบดินและพืช

เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว (Control) ปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนที่มาจากปุ๋ยในเมล็ดไม่เพิ่มขึ้นในตำรับการทดลองที่ใส่สารกำจัดสาหร่าย สารกำจัดสาหร่าย + PA และ NBPT(O) ร่วมกับยูเรีย (Table 2) ในขณะที่ตำรับการทดลองที่เหลืออื่น ๆ เพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยในเมล็ด อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ตำรับยูเรียที่ใส่ NBPT(O) + สารกำจัดสาหร่ายและ NBPT(O) + สารกำจัดสาหร่าย + PA เพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยในเมล็ดเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ CHPT เมื่อใส่ในรูปแบบเดียวกันสามารถเพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยในเมล็ดเป็น 3 เท่า (Table 2) นอกจากนี้ตำรับการทดลองที่ใส่ CHPT เพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากฟางอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามไม่มีตำรับการทดลองใดที่มีผลกระทบต่อปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยในรากสารยับยั้งยูเรียทั้ง 2 ชนิด เมื่อใส่ร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายหรือสารกำจัดสาหร่าย + PA เพิ่มปริมาณตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยไนโตรเจนในดินพืชทั้งหมด ในกรณีของ CHPT พบว่าปริมาณตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยเพิ่มขึ้นจาก 8.3 ถึง 20.7% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวกับตำรับที่ใส่ยูเรียร่วมกับ CHPT + สารกำจัดสาหร่าย + PA การสูญเสียไนโตรเจนที่ใส่ลงไปในระบบดินและพืชในตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวมีมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ลงไป เนื่องจากการสูญเสียไนโตรเจนโดยการระเหยของแอมโมเนียเกิดขึ้น 14.5 % ของปริมาณที่ใส่ลงไป ดังนั้นส่วนที่เหลืออาจเกิดจากการสูญเสียโดยไนตริฟิเคชัน เนื่องจากการสูญเสียไนโตรเจนโดยการชะล้างไม่ได้มีบทบาทที่สำคัญในดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองนี้ การใส่สารยับยั้งยูเรียเพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ย 37.6 % จากค่าเฉลี่ยตำรับการทดลองที่ไม่ได้ใส่สารยับยั้งยูเรีย ในขณะที่ค่าเฉลี่ยจากตำรับการทดลองของ NBPT(O) และ CHPT เท่ากับ 51.5 และ 61.8% ตามลำดับ

ผลผลิต

ผลผลิตเมล็ดในตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเท่ากับ 428.8 กก./ไร่ แต่เมื่อใส่ยูเรียในอัตรา 9.6 กก. ไนโตรเจนต่อไร่ปรากฏว่าผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้นเป็น 502.4 กก./ไร่ (Table 1) การใส่สารยับยั้งยูเรียไม่ว่าจะเป็น NBPT และ CHPT เพียงอย่างเดียวร่วมกับยูเรียไม่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตของตำรับที่ใส่ยูเรีย (Table 1) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานทดลองในนาข้าวก่อนหน้านี้ (Buresh *et al.*, 1988 a, b; Cai *et al.*, 1989 and Phongpan and Byrnes, 1990) อย่างไรก็ตามการใส่ BPT(O) หรือ CHPT ร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย หรือสารกำจัดสาหร่าย + PA เพิ่มผลผลิตเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงใน Table 1

ผลผลิตเมล็ดที่ได้มีปริมาณใกล้เคียงกับการทดลองในนาข้าวที่บังคลาเทศ และอินโดนีเซียในฤดูแล้ง (Schrier *et al.*, 1993) นอกจากนี้ผลผลิตเมล็ดที่เพิ่มขึ้นประมาณ 80 กก. ต่อไร่ของการทดลองนี้ให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยในสภาพไร่นาของ Phongpan *et al.* (1995) ของการทดลอง ณ สถานีทดลองเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า NBPT(O) และ CHPT สามารถยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพและปริมาณ AN จำนวนน้อยมากถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในน้ำท่วมขังดินในช่วงระยะเวลา 11 วัน CHPT ให้ประสิทธิภาพของสารยับยั้งยูเรียได้ดีกว่า NBPT(O) และเมื่อใส่อย่างเดียวหรือร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายสามารถลดการสูญเสียแอมโมเนีย จากตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว 14.5 % เหลือเพียงประมาณ 1% ของไนโตรเจนที่ใส่ลงไป

การใส่สารยับยั้งยูเรียร่วมกับสารกำจัดสาหร่าย และ/หรือสารยับยั้งไนตริฟิเคชันสามารถเพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยในดินพืชอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การใส่ NBPT(O) หรือ CHPT ร่วมกับ PA และสารกำจัดสาหร่ายเพิ่มปริมาณการตรวจพบไนโตรเจนจากปุ๋ยในเมล็ด 2–3 เท่า การใส่ CHPT ร่วมกับสารกำจัดสาหร่ายให้ผลผลิตเมล็ดสูงสุด 610 กก.ต่อไร่ และลดการสูญเสียแอมโมเนียจาก 14.5 % เหลือเพียง 1.4 % ของปริมาณที่ใส่เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว ซึ่งให้ผลผลิตเมล็ด 502.4 กก.ต่อไร่

Table 1 Effect of urease inhibitor treatments on NH_3 loss and grain yield of flooded rice topdressed with urea (9.6 kg N rai^{-1}), nitrification inhibitor and algicide.

Treatment	NH_3 loss (% applied)		Grain yield (kg rai^{-1})	
	-Algicide	+Algicide	-Algicide	+Algicide
Control (urea only)	14.5	11.8	502.4	542.4
PA	12.2	10.1	540.8	540.8
NBPTO	7.6	3.5	507.2	588.8
NBPTO + PA	8.0	2.5	532.8	584.0
CHPT	1.1	1.4	512.0	609.6
CHPT + PA	2.4	1.6	542.4	585.4
LSD ($p = 0.05$)		5.3		5.6
CV (%)		9.2		6.5

The plots without added N yielded 428.8 kg rai^{-1}

PA = phenylacetylene, NBPTO = N-(n-butyl) phosphorictriamide,

CHPT = cyclohexylphosphorictriamide.

Table 2 Effect of inhibitor treatments on recovery of fertilizer nitrogen (% of applied N)

Treatment	Grain	Straw	Roots	Total plant	Soil	Plant + soil
Control (urea only)	4.3	3.6	0.5	8.3	40.3	48.6
PA	7.2	2.7	0.3	10.2	35.0	45.2
Algicide	5.2	3.5	0.4	9.1	40.1	49.2
PA + algicide	6.6	3.8	0.4	10.8	43.5	54.3
NBPTO	5.1	5.0	0.4	10.5	55.6	66.1
NBPTO + PA	7.7	4.8	0.5	13.0	84.2	97.2
NBPTO + algicide	8.8	4.8	0.6	14.2	42.6	56.8
NBPTO + PA + algicide	9.6	5.5	0.6	15.7	51.7	67.4
CHPT	7.5	7.6	0.6	15.7	41.9	57.6
CHPT + PA	7.2	4.8	0.6	12.6	64.4	77.0
CHPT + algicide	13.4	8.6	0.5	22.5	46.6	69.1
CHPT + PA + algicide	13.0	7.2	0.5	20.7	39.3	60.0
LSD ($p = 0.05$)	2.6	2.7	NS	2.2	NS	NS
CV (%)	12.3	12.4	6.5	16.2	18.2	19.5

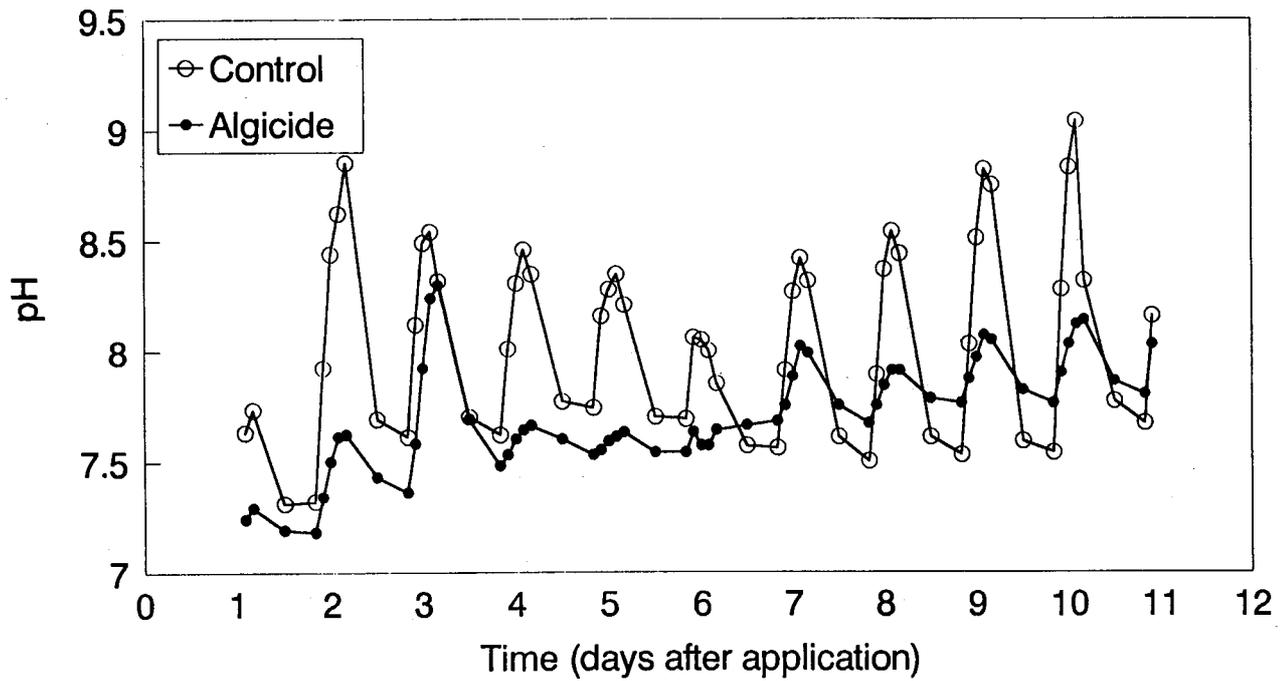


Fig. 1 Floodwater pH as affected by algicide treatment.

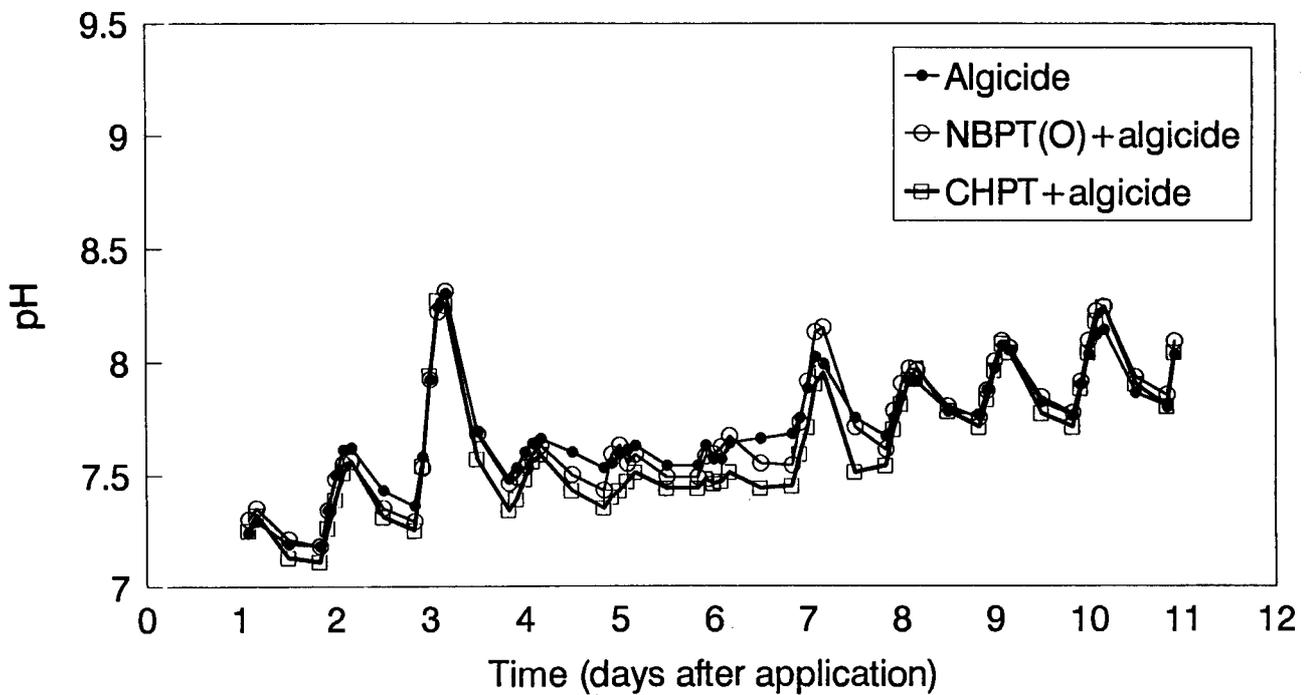


Fig. 2 Effect to the urease inhibitors NBPT (O) and CHPT on floodwater pH.

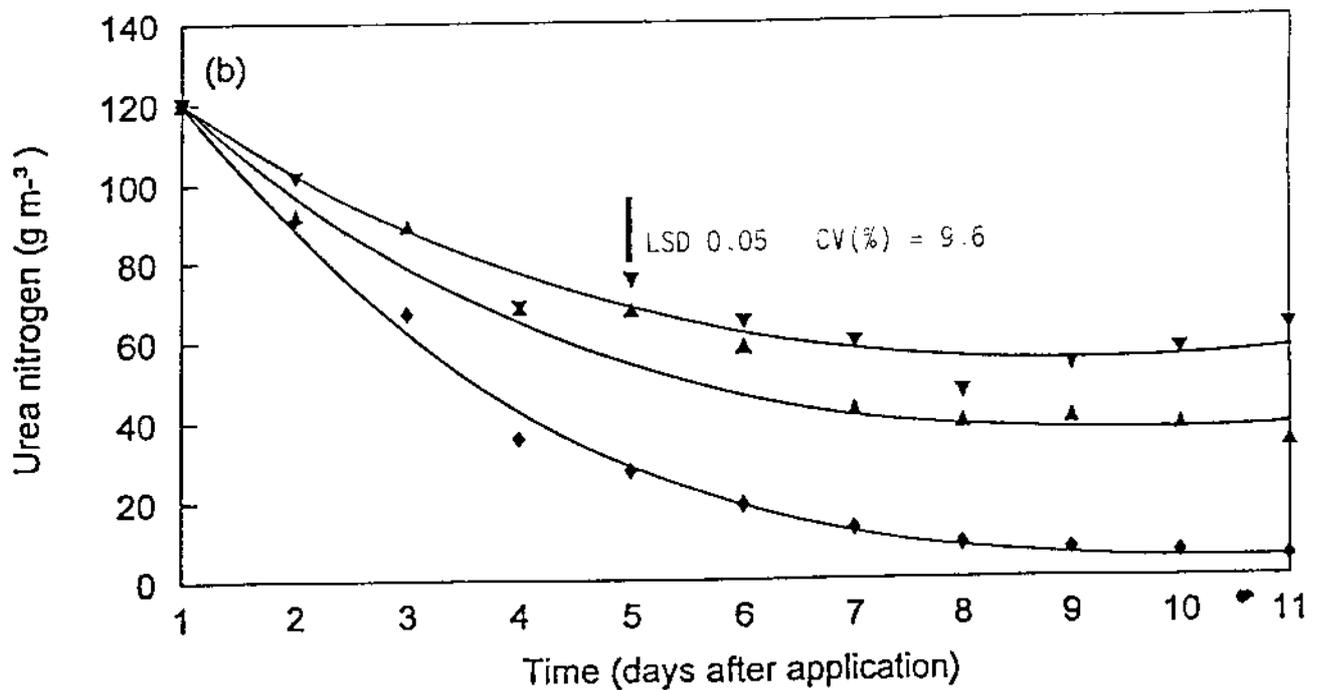
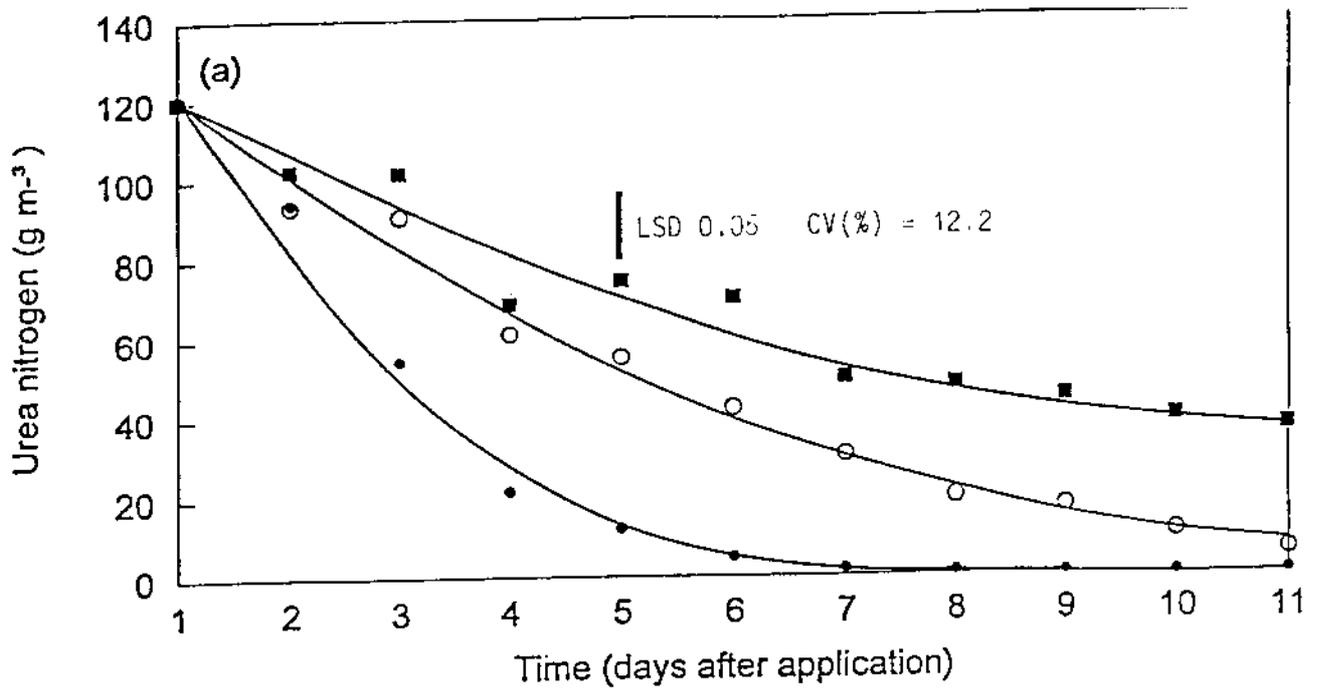


Fig. 3 Urea concentrations in the floodwater as affected by treatments:
 (a) control (Urea only, ●), NBPT(0) [○], CHPT (■)
 (b) algicide (◆), NBPT(0) + algicide (▲), CHPT + algicide (▼)

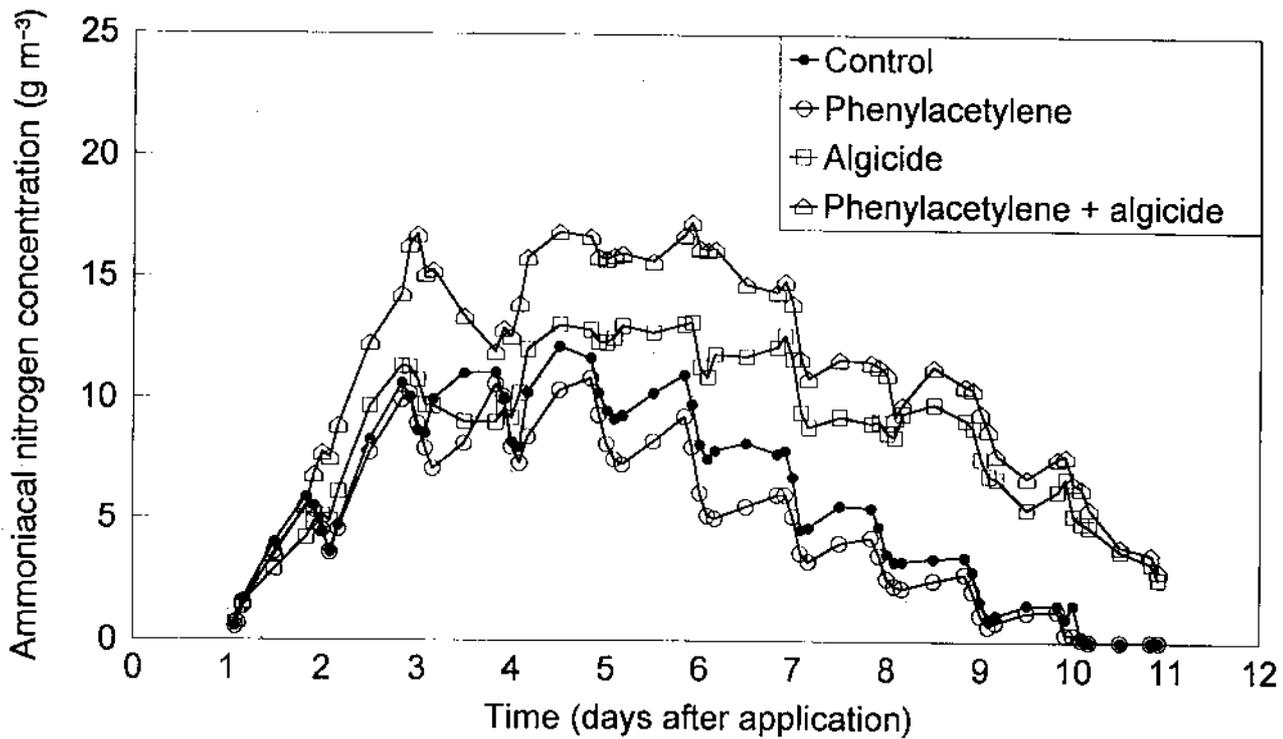


Fig. 4 Ammoniacal nitrogen in floodwater as affected by the algicide and nitrification inhibitor treatments.

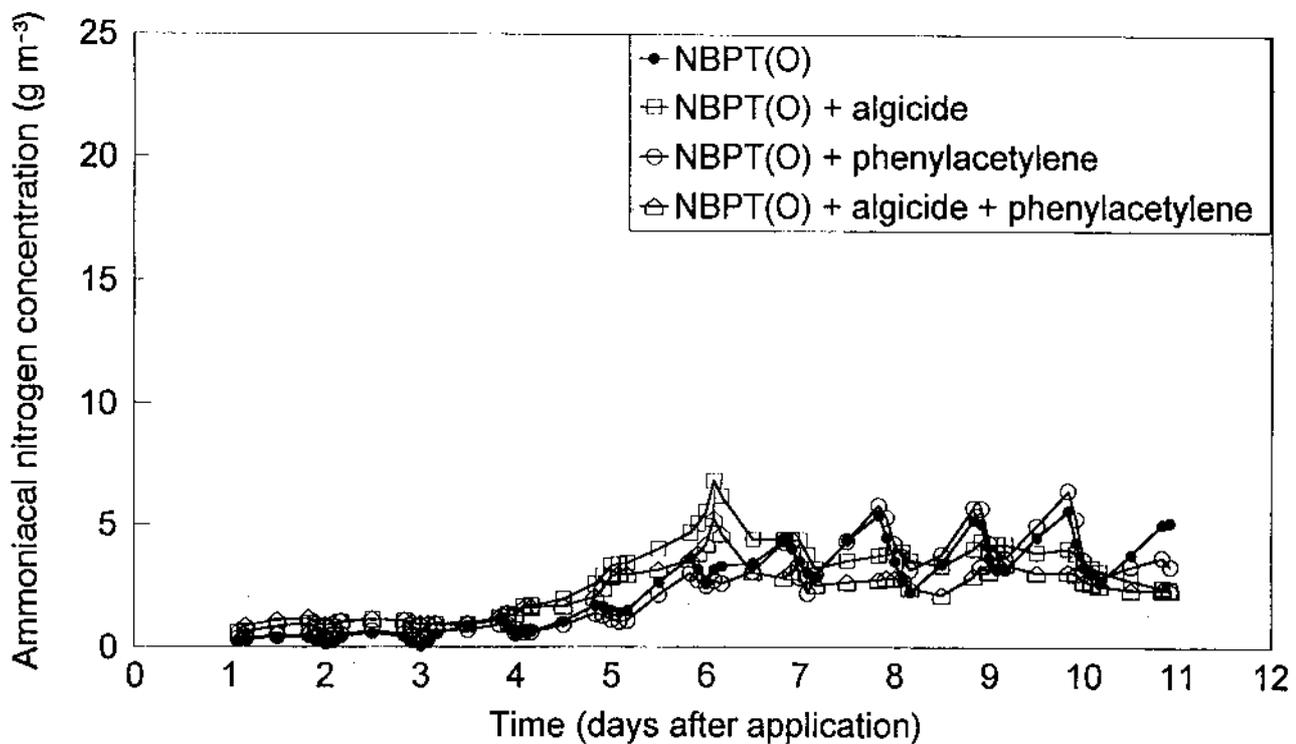


Fig. 5 Ammoniacal nitrogen in floodwater as affected by the urease inhibitor NBPT(O), algicide and nitrification inhibitor treatments.

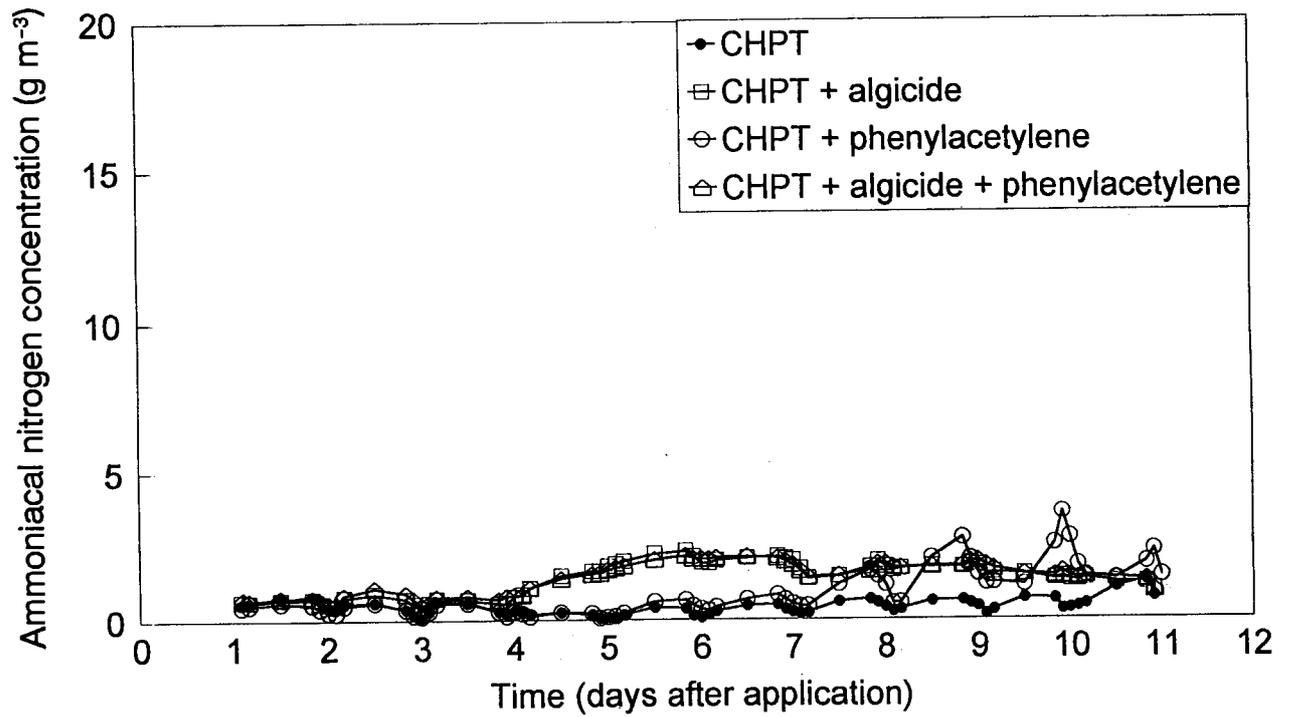


Fig.6 Effect of the urease inhibitor CHPT, algicide and nitrification inhibitor treatments on the ammoniacal nitrogen concentration of the floodwater.

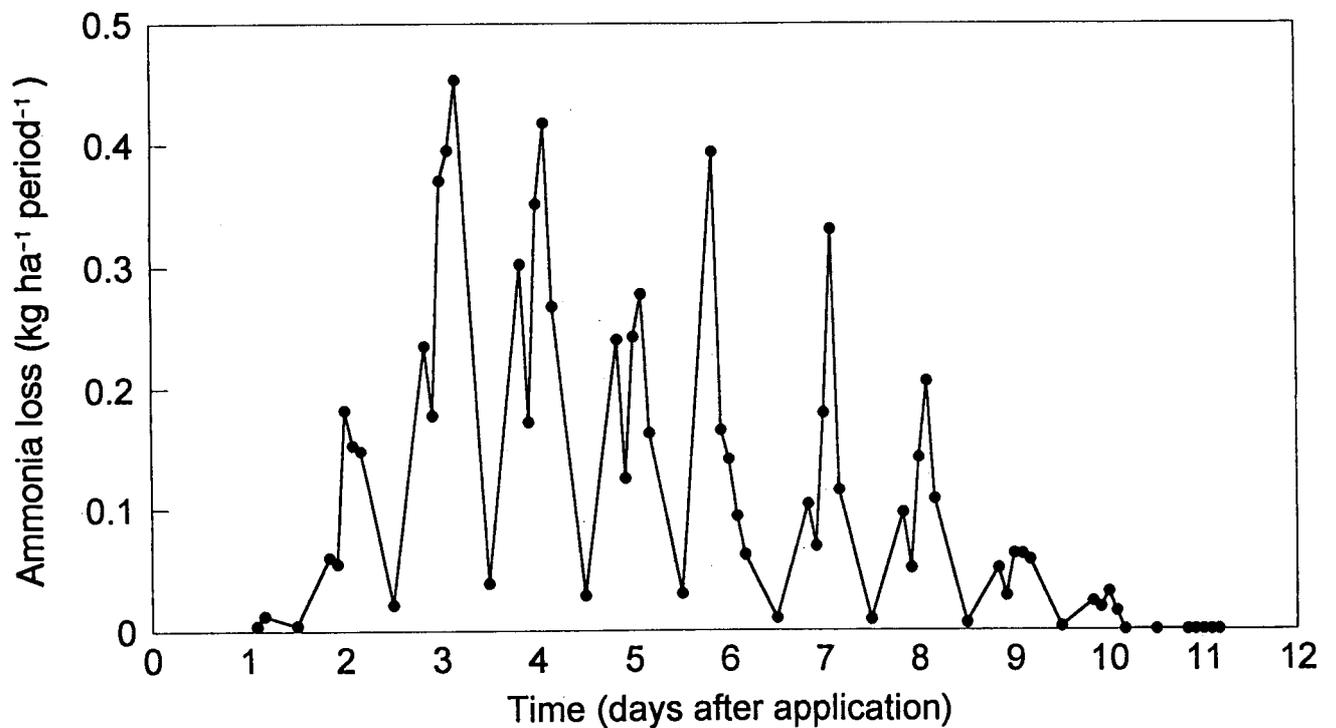


Fig. 7 Ammonia loss from the control treatment following urea application.

- Beyrouy, C.A. ; L.E. Sommers and D.W. Nelson. 1988. Ammonia volatilization from surface-applied urea as affected by several phosphoroamide compounds. *Soil Sci Soc Am J.* 52 : 1173-1178.
- Bowmer, K.H. and W.A. Muirhead. 1987. Inhibition of algal photosynthesis to control pH and reduce ammonia volatilization from rice flood-water. *Fert Res.* 13 : 13-29.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. Pages 1149-1178. In : C.A. Black (ed) *Methods of Soil Analysis Part 2.* Madison, Wisc : Am Soc Agron.
- Bremner, J.M. and H.S. Chai. 1986. Evaluation of N-(n-butyl) phosphorothioic triamide for retardation of urea hydrolysis in soil. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 17 : 337-351.
- Bronson, K.F. ; J.T. Touchton; A.E. Hiltbold and L.L. Hendrickson. 1989. Control of ammonia volatilization with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in loamy sands. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 20 : 1439-1451.
- Buresh, R.J. ; S.K. De Datta ; J.L. Padilla and T.T. Chua. 1988 a. Potential of inhibitors for increasing response of lowland rice to urea fertilization. *Agron J.* 80 : 947-952.
- Buresh, R.J. ; S.K. De Datta. ; J.L. Padilla and M.I. Samson. 1988 b. Field evaluation of two urease inhibitors with transplanted lowland rice. *Agron J.* 80 : 763-768.
- Byranes, B.H. and C.B. Christianson. 1988. Development of a urease inhibitor from N-(n-butyl) thiophosphoric triamide. *Agron Abs.* P 212.
- Byrnes, B.H. ; N.K. Savant and E.T. Craswell. 1983. Effect of a urease inhibitor phenyl phosphorodiamidate on the efficiency of urea applied to rice. *Soil Sci Soc Am J.* 47 : 270-274.
- Cai, G.X. ; Z.L. Zhu ; A.C.F. Trevitt. ; J.R. Freney and J.R. Simpson. 1986. Nitrogen loss from ammonium bicarbonate and urea fertilizers applied to flooded rice. *Fert Res.* 10 : 203-215.
- Cai, G.X. ; J.R. Freney. ; W.A. Muirhead.; J.R. Simpson. ; D.L. Chen and A.C.F. Trevitt. 1989. The evaluation of urease inhibitors to improve the efficiency of urea as a N-source for flooded rice. *Soil Biol Biochem.* 21 : 137-145.
- Cao, Z.H. ; S.K. De Datta and I.R.P. Fillery. 1984. Effect of placement methods on floodwater properties and recovery of applied nitrogen (¹⁵N-labeled urea) in wetland rice. *Soil Sci Soc Am J.* 48 : 196-203.
- Chai, H.S. and J.M. Bremner. 1987. Evaluation of some phosphoroamides as soil urease inhibitors. *Biol Fertil Soils.* 3 : 189-194.
- Chaiwanakupt, P ; J.R. Freney; D.G. Keerthisinghe. ; S. Phongpan and R.L. Blakeley. 1996. Use of urease and nitrification inhibitors to reduce nitrogen loss and increase grain yield of flooded rice (*Oryza Sativa* L.). *Biol Fertil Soils.* 22 : 89-95.
- Cristianson, C.B. ; B.H. Byrnes and G. Carmona. 1990. A comparison of the sulfur and oxygen analogs of phosphoric triamide urease inhibitors in reducing urea hydrolysis and ammonia volatilization. *Fert Res.* 26 : 21-27.
- Craswell, E.T. ; S.K. De Datta. ; W.N. Obcemea and M. Hartantyo. 1981. Time and mode of nitrogen fertilizer application to tropical wetland rice. *Fert Res.* 2 : 247-259.
- Creason, G.L. ; M.R. Schmitt. ; E.A. Douglass and L.L. Hendrickson. 1990. Urease inhibitory activity associated with N-(n-butyl)

- thiophosphoric triamide is due to formation of its oxon analogue. *Soil Biol Biochem.* 22 : 209–211.
- De Datta, S.K. 1987. Advances in soil fertility research and nitrogen fertilizer management for lowland rice. Pages 27–41. In : Freney JR, Wetselaar R, Trevitt ACF and Simpson JR (eds). Efficiency of Nitrogen Fertilizers for Rice. Los Banos : International Rice Research Institute.
- De Datta, S.K. ; A.C.F. Trevitt. ; J.R. Freney. ; W.N. Obcemea.; J.G. Real and J.R. Simpson. 1989. Measuring nitrogen losses from lowland rice using bulk aerodynamic and nitrogen–15 balance methods. *Soil Sci Soc Am J.* 53 : 1275–1281.
- Denmead, O.T. 1983. Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field. Pages 133–157. In : J.R. Freney and J.R. Simpson (eds). Gaseous Loss of Nitrogen from Plant–Soil Systems. The Hague : Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers.
- Fillery, I.R.P. and P.L.G. Vlek. 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. *Fert Res.* 9 : 79–98.
- Fillery, I.R.P. ; J.R. Simpson and S.K. De Datta. 1984. Influence of field environment and fertilizer management on ammonia loss from flooded soil. *Soil Sci Soc Am J.* 48 : 914–920.
- Fillery, I.R.P. ; J.R. Simpson and S.K. De Datta. 1986. Contribution of ammonia volatilization to total nitrogen loss after application of urea to wetland rice fields. *Fert Res.* 8 : 193–202.
- Freney, J.R. and O.T. Denmead. 1992. Factors controlling ammonia and nitrous oxide emissions from flooded rice fields. *Ecol Bull.* 42 : 188–194.
- Freney, J.R. ; R. Leaning. ; J.R. Simpson ; O.T. Denmead and W.A. Muirhead. 1985. Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified techniques. *Soil Sci Soc Am J.* 49 : 1049–1054.
- Freney, J.R. ; A.C.F. Trevitt. ; S.K. De Datta. ; W.N. Obcemea and J.G. Real. 1990. The interdependence of ammonia volatilization and denitrification as nitrogen loss processes in flooded rice in the Philippines. *Biol Fertil Soils.* 9 : 31–36.
- Keerthisinghe, D.G. and J.R. Freney. 1994. Inhibition of urease activity in flooded soils : Effect of thiophosphoric triamides and phosphoric triamides. *Soil Biol Biochem.* 26 : 1527–1533.
- Kole, J.F. ; M.D. Swerdloff. ; M.M. Rogic. ; L.L. Hendrickson and M. Van der Puy. 1985. N–aliphatic and N, N–aliphatic phosphoric triamide urease inhibitors and urease inhibited urea based fertilizer combinations, U.S. Patent 4530714.
- Leuning, R. J.R. Freney, O.T. Denmead and J.R. Simpson 1985. A sampler for measuring atmospheric ammonia flux. *Atmos Environ.* 18 : 1583–1592.
- Lou, Qul–xian., J.R. Freney ; D.G. Keerthisinghe and M.B. Peoples. 1994. Inhibition of urease activity in flooded soils by phenylphosphorodiamidate and N–(n–butyl) thiophosphoric triamide. *Soil Biol Biochem.* 26 : 1059–1065.
- Mc Carty, G.W. ; J.M. Bremner and H.S. Chai. 1989. Effect of N–(n–butyl) thiophosphoric triamide on hydrolysis of urea by plant, microbial, and soil urease. *Biol Fertil Soils.* 8 : 123–127.
- Mc Carty, G.W. and J.M. Bremner. 1986. Inhibition of nitrification in soil by acetylenic compounds. *Soil Sci Soc. Am J.* 50 : 1198–1201.

- Mikkelsen, D.S. ; S.K. De Datta and W.N. Obcemea. 1978. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. *Soil Sci Soc. Am.J.* 49 : 725–730.
- Muirhead, W.A. ; S.K. De Datta. ; P.A. Roger and R.M. Gusto. 1989. Effect of algicides and urea fertilizer efficiency in transplanted rice : I Floodwater chemistry and biota. *Fert. Res.* 21 : 95–107.
- Mulvaney, R.L. and J.M. Bremner. 1979. A modified diacetylmonoxime method for colorimetric determination of urea in soil extracts. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 10 : 1163–1170.
- Orion. 1983. Instruction Manual for Ammonia Electrode Model 95–12. Cambridge, Mass : Orion Research Inc.
- Phongpan, S. and B.H. Byrnes. 1990. The effect of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on the efficiency of urea application in a flooded rice field trial in Thailand. *Fert Res.* 25 : 145–151.
- Phongpan, S. ; J.R. Freney. ; D.G. Keerthisinghe and P. Chaiwanakupt 1995. Use of phenylphosphorodiamidate and N-(n-butyl) thiophosphoric triamide to reduce ammonia loss and increase grain yield following application of urea to flooded rice. *Fert. Res.* 41 : 59–66.
- Rodgers, G.A. 1983. Effect of dicyandiamide on ammonia volatilization from urea in soil. *Fert Res.* 4 : 361–367.
- Schnier, H.F. ; S.K. De Datta. ; A.M. Fagi ; M. Eaqub. ; A. Faruque. ; R. Tejasarwana and A. Mazid. 1993. Yield response of wetland rice to band placement of urea solution in various soils in the tropics. *Fert Res.* 36 : 221–227.
- Schlegel, A.J. ; D.W. Nelson and L.E. Sommers. 1986. Field evaluation of urease inhibitors for corn production. *Agron J.* 78 : 1007–1012.
- Simpson, J.R. ; J.R. Freney. ; R. Wetselaar. ; W.A. Muirhead. ; R. Leuning and O.T. Denmead. 1984. Transformations and losses of urea nitrogen after application to flooded rice. *Aust J Agric Res.* 35 : 189–200.
- Simpson, J.R. ; J.R. Freney. ; W.A. Muirhead and R. Leuning 1985. Effects of phenylphosphorodiamidate and dicyandiamide on nitrogen loss from flooded rice. *Soil Sci Soc. Am J.* 49 : 1426–1431.
- Stangel, P.J. and G.T. Harris. 1987. Trends in production, trade and use of fertilizers : A global perspective. Pages 1–26. In : Freney, J.R., R. Wetselaar, A.C.F. Trevitt and J.R. Simpson (eds). *Efficiency of Nitrogen Fertilizers for Rice.* Los Banos : International Rice Research Institute.
- Vlek, P.L.G. and B.H. Byrnes. 1986. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice. *Fert Res.* 9 : 131–147.
- Vlek, P.L.G. and E.T. Craswell. 1981. Ammonia volatilization from flooded soils. *Fert. Res.* 2 : 227–245.
- Zhu, Z.L. ; G.X. Cai. ; J.R. Simpson. ; S.L. Zhang. ; D.L. Chen. ; A.V. Jackson and J.R. Freney. 1989. Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in north-central China. *Fert Res.* 18 : 101–115.