การใช้สารยับยั้งการสูญเสียไนโตรเจน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยยูเรียในนาข้าว

Use of Inhibitors to Improve the Efficiency of Urea Fertilizer in Lowland Rice Field

สาคร ผ่องพันธ์[1] พรพิมล ชัยวรรณคุปต์[1] ชยงค์ นามเมือง[2]
จริยา ประศาสน์ศรีสุภาพ[1] แพรพรรณ กุลนทีทิพย์[1] เจนวิทย์ สุขทองสา[3]

Sakorn Phongpan[1] Pornpimol Chaiwanakupt[1] Chayong Nammuang[2]
Jariya Prasatsrisupab[1] Prewpan Kulnateetip[1] Jenvith Sookthongsa[3]

ABSTRACT

Attempts were made to reduce N loss from urea broadcast into the floodwater after transplanting and increase the efficient utilization of fertilizer N by flooded rice. A field experiment was conducted at the Suphanburi Rice Experiment Station in the 1991 wet season to study the effect of inhibitors; phenylphosphorodiamidate (PPD), N-(n-butyl) thiophosphorictriamide (NBPT), algicide terbutryn and wax-coated calcium carbide (CaC_2) on the fate and efficiency of urea applied to flooded rice (variety SPR90) grown on a Phimai soil (Fluvic Tropaquept) at the rate of 12 kg N rai^{-1}

The results showed that the addition of algicide with urea maintained the floodwater pH values below 8.5 for the first three days after urea application and increased the accumulation of ammoniacal N higher than that of urea alone particularly the first five days. In the CaC_2 treatment, although slight increases in floodwater pH were apparent, ammoniacal-N increased at a faster rate than the control. In contrast, single and repeated additions of NBPT with urea resulted in much lower ammoniacal-N accumulation (<50%). Application of the mixed inhibitors with urea also resulted in a similar pattern of ammoniacal-N accumulation as was obtained with the single NBPT treatment.

The maximum rate of NH_3 loss (6.7 g N $m^{-2}s^{-1}$) occurred two days after urea application and decreased thereafter to a minimum after day 9. In the urea treatment, NH_3 loss accounted for 20% of the applied N. Addition of algicide with urea reduced the total NH_3 to a half (10.2%). In the presence of CaC_2, 15% of the applied N was lost as NH_3 compared with 10% from the NBPT treatment. The lowest NH_3 loss was obtained from the mixed inhibitors + algicide treatment which reduced NH_3 loss to 7% and increased a maximum grain yield upto 31% (746.6 kg rai^{-2}) when compared with the control (unamended urea).

(1) กลุ่มงานนิวเคลียร์เทคนิคการเกษตร กองเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร
Nuclear Research in Agriculture Section, Agricultural Chemistry Division, Department of Agriculture
(2) กลุ่มงานวิจัยดินและปุ๋ยข้าว กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร
Soil and Fertilizer Research on Rice, Soil Science Division, Department of Agriculture
(3) สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร
Suphanburi Rice Experiment Station, Rice Research Institute, Department of Agriculture

บทคัดย่อ

จากความพยายามที่จะลดการสูญเสียไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรียเมื่อใส่แบบหว่านในน้ำที่ท่วมขังดินภายหลังการปักดำ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของปุ๋ยไนโตรเจนโดยข้าวให้ดียิ่งขึ้นจึงได้ดำเนินการทดลอง ณ สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี ในฤดูนาปี พ.ศ. 2534 เพื่อศึกษาผลการใช้สารยับยั้งไนโตรเจนคือ phenylphosphorodiamidate (PPD), N-(n-butyl) thiophosphorictriamide (NBPT), algicide ชื่อ terbutryn และ wax coated calcium carbide (CaC_2) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงและประสิทธิภาพของปุ๋ยยูเรียเมื่อใส่ให้แก่ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่ปลูกในดินนาชุดพิมาย (Fluvic Tropaquept) ในอัตรา 12 kg N ต่อไร่

ผลการทดลองพบว่าการใส่ algicide ร่วมกับยูเรียสามารถลด pH ของน้ำที่ท่วมขังดินให้อยู่ต่ำกว่า 8.5 ในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรียและเพิ่มปริมาณการสะสม ammoniacal-N ให้สูงกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวโดยเฉพาะใน 5 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรีย ส่วนกรรมวิธีที่ใส่ CaC_2 ร่วมกับยูเรียแม้ว่าเพิ่ม pH ในน้ำให้สูงขึ้งเพียงเล็กน้อยแต่สามารถเพิ่มปริมาณ ammoniacal-N ในอัตราที่เร็วกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว ในทางตรงกันข้ามการใส่ NBPT ร่วมกับยูเรียไม่ว่าใส่ครั้งเดียวหรือหลายครั้งสามารถลดปริมาณการสะสม ammoniacal-N มากกว่า 50% การใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมร่วมกับยูเรียให้รูปแบบปริมาณการสะสมของ ammoniacal-N คล้ายคลึงกับการใส่ NBPT เพียงอย่างเดียวร่วมกับยูเรีย

อัตราการสูญเสียแอมโมเนียเกิดขึ้นสูงสุด (6.7 μg N m^{-2} s^{-1}) 2 วัน ภายหลังการใส่ปุ๋ยยูเรีย และค่อยๆ ลดลงจนเหลือต่ำสุดในวันที่ 9 ในกรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว การสูญเสียแอมโมเนียเกิดขึ้น 20.5% ของปริมาณที่ใส่ลงไป การใส่ algicide ร่วมกับยูเรียสามารถลดปริมาณการสูญเสียแอมโมเนียลงครึ่งหนึ่ง (10.2%) ส่วนการใส่ CaC_2 ร่วมกับยูเรียมีผลทำให้การสูญเสียแอมโมเนียเกิดขึ้น 14% ในขณะที่การใส่ CaC_2 ร่วมกับยูเรียชักนำให้เกิดการสูญเสียแอมโมเนีย 10% ส่วนตำรับที่มีการสูญเสียแอมโมเนียน้อยที่สุดคือยูเรียร่วมกับสารยับยั้งยูรีเอสผสมและ algicide ซึ่งลดการสูญเสียให้เหลือเพียง 7% และให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 31% (745.6 กก. ต่อไร่) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว

คำนำ

จากการวิจัยที่ผ่านมาโดยใช้วิธีการทางอุตุนิยมวิทยาและความสมดุลของไนโตรเจน-15 (micrometeorological & ^{15}N-balance methods) พบว่าต้นข้าวที่ปลูกในดินนาบริเวณที่ลุ่มสามารถใช้ประโยชน์จากปุ๋ยยูเรียได้เพียงแค่ 30-40% ของปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ลงไป ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซไปในบรรยากาศเป็นส่วนใหญ่โดยกระบวนการระเหยในรูปก๊าซแอมโมเนีย (NH_3 volatilization) และการระเหยในรูปก๊าซไนโตรเจนหรือออกไซด์ของไนโตรเจนที่เรียกว่า denitrification (Simpson *et al.* 1984; Freney *et al.* 1985; Cai *et al.* 1986; Fillery and De Datta 1986; Fillery and Vlek 1986; Fillery *et al.* 1986; Vlek and Byrnes 1986; De Datta and Buresh 1989; De Datta *et al.* 1989; Zhu *et al.* 1989) การสูญเสียแอมโมเนียเกิดขึ้นในปริมาณที่แตกต่าง 5 ถึง 56% ของปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ลงไป (Freney *et al.* 1981; 1990; Fillery *et al.* 1984; 1986; Fillery and De Datta 1986; Simpson and Freney 1988; Buresh *et al.* 1991)

ส่วนการสูญเสียโดย denitrification อยู่ในช่วงตั้งแต่ต่ำจนวัดปริมาณไม่ได้จนสูงถึง 70% (Simpson *et al.* 1984; Fillery and De Datta 1986; Fillery and Vlek 1986; Fillery *et al.* 1986; Buresh and De Datta 1990; Freney et al. 1990; Buresh *et al.* 1991; Zhu. 1982)

ความสำคัญของกระบวนการสูญเสียไนโตรเจนทั้งสองที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน รูป อัตรา และวิธีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน การเจริญเติบโต

ของสาหร่ายในน้ำและสภาพสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (Fillery and Vlek 1986; Simpson and Freney 1988; De Datta and Buresh 1989; Freney *et al.* 1990; Zhu 1982) การควบคุมกระบวนการสูญเสียใดกระบวนการหนึ่งเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถลดการสูญเสียไนโตรเจนรวมทั้งหมดได้ การลดการสูญเสียแอมโมเนียโดยการไถคราดกลบปุ๋ยจมฝังดิน หรือเพิ่มระดับน้ำอาจมีผลทำให้ไนโตรเจนที่ใส่ลงไปถูก nitrified และชักนำให้เกิดการสูญเสียโดย denitrification ในอัตราที่สูงขึ้น (Freney *et al.* 1988; 1990) ในทางกลับกันการยับยั้งปฏิกริยา nitrification โดยการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติเช่นนั้นอาจมีผลต่อการสะสมปริมาณของ ammoniacal-N (NH_3 + NH_4^+) ในน้ำที่ท่วมขังดินให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งอาจเพิ่มการสูญเสียไนโตรเจนโดยการระเหยของแอมโมเนียให้สูงขึ้น (Rodgers 1983)

การสูญเสียไนโตรเจนเกือบทั้งหมดมักเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 2 สัปดาห์ภายหลังการใส่ปุ๋ย ทั้งนี้เนื่องจากภายหลังระยะเวลาดังกล่าวปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N มีเหลืออยู่ค่อนข้างต่ำในน้ำที่ท่วมขังดินรวมทั้ง available cabon ในดินมีเหลืออยู่ต่ำอีกด้วย (Zhu *et al.*1979; Fillery *et al.* 1984; Simpson *et al.* 1985; Cai *et al.* 1986; Mosier *et al.* 1989; Freney *et al.* 1990) ดังนั้นผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยไนโตรเจนให้สูงขึ้นสามารถกระทำได้โดยเลือกวิธีการที่ปฏิบัติที่สามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N ในน้ำที่ท่วมขังดินและปฏิกริยา nitrification เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์หลังการใส่ปุ๋ย การใส่สารเคมีที่สามารถยับยั้งปฏิกริยาไฮโดรไลซีส (hydrolysis) ของยูเรียโดยกิจกรรมของเอนไซม์ยูเรียเอส (urease) ที่อยู่ในดินให้ช้าลง จึงเป็นแนวทางการปฏิบัติที่อาจเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามจากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้สารยับยั้งยูเรียเอสที่มีแนวโน้มว่ามีศักยภาพ คือ phenylphosphorodiamidate (PPD) และ N-(butyl) thiophosphorictriamide (NBPT) ในนาข้าวมีโอกาสน้อยครั้งมากที่ประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของไนโตรเจนและเพิ่มผลผลิตข้าว (Simpson *et al.* 1985; Fillery *et al.* 1986; Buresh *et al.* 1988a, 1988b; Phongpan and Bynes 1990) เหตุผลที่อธิบายถึงความล้มเหลวของการใช้สารยับยั้งยูรีเอสมีหลักฐานอ้างอิงหลายข้อ อาทิ การสลายตัวของ PPD ที่ pH หรืออุณหภูมิสูง (Austin *et al.* 1984; Martens and Bremner 1984) ในกรณีของ NBPT นั้นประสิทธิภาพในการยับยั้งกิจกรรมของยูรีเอสจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อตัวมันเองจำเป็นต้องเปลี่ยนกลายเป็น oxygen analog คือ (n-butyl) phosphorictriamide หรือ NBPT-O เสียก่อน (Chai *et al.* 1988; Creason *et al.* 1990)

การใช้สารยับยั้งยูรีเอสเพื่อลดการสูญเสียแอมโมเนียอาจมีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่ไม่สูญเสียโดยการระเหยของแอมโมเนียถูก nitrified และสูญเสียในรูป N_2 และ N_2O โดยกระบวนการ denitrification ในกรณีดังกล่าวนี้การใช้สารยับยั้งปฏิกริยา nitrification เพื่อยับยั้งปฏิกริยา oxidation ของ NH^+_4 ให้กลายเป็น NO_3 โดยกิจกรรมของ nitrifying microorganisms เพื่อลดปริมาณ NO_3 ที่เกิดขึ้นมีผลโดยตรงต่อการลดการสูญเสียไนโตรเจนโดยกระบวนการ denitrification Banerjee and Mosier (1989) ได้รายงานการใช้ wax-coated calcium carbide (CaC_2) เมื่อทำปฏิกริยากับน้ำในดินสามารถปลดปล่อยก๊าซ acetylene (C_2H_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารยับยั้งปฏิกริยา nitrification

วัตถุประสงค์ของการทดลองครั้งนี้เพื่อศึกษาผลการใช้สารยับยั้งยูรีเอส และ algicide ชื่อ terbutryn (Bowmer and Muirhead 1987) และ wax-coated calcium carbide ในการลดการสูญเสียไนโตรเจนโดยกระบวนการระเหยของแอมโมเนีย และ denitrification

อุปกรณ์และวิธีการ

ดำเนินการทดลองในฤดูนาปี พ.ศ. 2534 (สิงหาคม-พฤศจิกายน) ณ นาข้าวของสถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี (100°8′E,14° 28′N) ดินที่ทดลอง

เกิดจากตะกอนของน้ำจืด (Fresh Water Alluvial Soil: Fluvic Tropaquept, SMSS 1983) และคุณสมบัติบางประการของดินดังกล่าวได้แสดงไว้ใน Table 1

ทำการไถคราดเตรียมแปลงวงกลมจำนวน 1 แปลงให้มีเส้นรัศมียาว 25 เมตรและคันดินล้อมรอบสูงประมาณ 0.2 เมตร เพื่อใช้วัดการระเหยของแอมโมเนียโดยตรงจากยูเรียที่หว่านลงไปในน้ำภายในแปลงวงกลม เตรียมแปลงย่อยขนาด 4x4 เมตร จำนวน 39 แปลงให้มีคันสูง 0.2 เมตร และกว้าง 0.4 เมตร โดยใช้พลาสติกสีดำฝังล้อมรอบด้านในของแปลงลึกประมาณ 0.3 เมตร แปลงย่อยดังกล่าวได้กำหนดให้ห่างจากแปลงวงกลมประมาณ 40 เมตร และอยู่ในทิศทางด้านเหนือลมของแปลงวงกลม จัดการทดลองแบบ randomized complete block มี 3 ซ้ำ ทำการใส่ปุ๋ยรองพื้น คือทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (46% P_2O_5) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (60% K_2O) ในอัตรา 3.8 กก. ฟอสฟอรัสต่อไร่ และ 4.5 กก. โพแทสเซียมต่อไร่ ตามลำดับ โดยหว่านปุ๋ยไปบนผิวดินที่ได้ระบายน้ำออกจนเหลือน้อยที่สุดและทำการไถคราดกลบให้ปุ๋ยจมฝังดินแล้วทำการปักดำด้วยกล้าพันธุ์ข้าวสุพรรณบุรี 90 อายุประมาณ 3 สัปดาห์ ใช้ระยะปลูก 20x20 ซม. จำนวน 3 ต้นต่อจับในวันที่ 24 กรกฎาคม 2534 ภายหลังการปักดำปรับระดับน้ำในแปลงวงกลมและแปลงย่อยให้อยู่ที่ประมาณ 5 ซม. และรักษาระดับดังกล่าวให้ใกล้เคียงกันตลอดช่วงการวัดและเก็บตัวอย่างน้ำในแปลง

Table 1. Some characteristics of the surface soil (0-0.2 m) at the experimental site.

Characteristic	
Soil series	Phimai
Soil texture	Clay
pH (1 : 1 soil : water)	5.1
Total N (g kg^{-1})	1.6
Organic matter (g kg^{-1})	35
Cation exchange capacity ($cmol_c$ kg^{-1})	28
Extractable P, Bray 2 (mg kg^{-1})	17
Exchangeable K, IN NH_4OAc, pH7 (mg kg^{-1})	127
Clay (g kg^{-1})	680
Silt (g kg^{-1})	180
Sand (g kg^{-1})	140

ใส่ปุ๋ยยูเรีย (46% N) ในแปลงวงกลมวันที่ 24 กรกฎาคม 2534 ในอัตรา 12 กก. ไนโตรเจนต่อไร่ โดยหว่านปุ๋ยไปบนน้ำที่ท่วมขังดิน ส่วนในแปลงย่อยก็ใช้อัตราและวิธีการใส่ยูเรียเช่นเดียวกับแปลงวงกลม ยกเว้นกรรมวิธีที่มีการใส่สารยับยั้งร่วมด้วย ซึ่งทำการใส่สารยับยั้งภายหลัง 16.00 น. ของวันที่ 24 กรกฎาคม 2534 แล้วใส่ปุ๋ยยูเรียทันที กรรมวิธีการทดลองประกอบด้วย (1) control (ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว) (2) calcium carbide (3) algicide (4) calcium carbide + algicide (5) NBPT (6) NBPT + calcium carbide (7) NBPT + algicide (8) NBPT + calcium carbide + algicide (9) repeated application of NBPT (10) mixed inhibitors (11) mixed inhibitors + calcium carbide + algicide (12) mixed inhibitors + algicide, (13) mixed inhibitors + calcium carbide + algicide เตรียม wax coated calcium carbide (27% CaC_2) โดยใช้วิธีการของ Bronson and Mosier (1991) และใส่ในอัตรา 640 กรัม active ingredient ต่อไร่ สำหรับ algicide คือ terbutryn [2-(ter-butylamino)-4-(ethylamino) -6 methylthio)-triazine] ใส่ในอัตรา 0.2 มก. active ingredient ต่อน้ำ 1 ลิตร โดยละลายน้ำแล้วฉีดพ่นในแปลงทุก 3 วัน สารยับยั้งยูรีเอส NBPT ใส่ในอัตรา 0.5% ของน้ำหนักยูเรียโดยละลายในน้ำและฉีดให้ทั่วไปบนน้ำที่ท่วมขังในแปลงก่อนการใส่ยูเรีย ในกรณีที่ใส่ NBPT หลายครั้งทำการฉีดพ่นในอัตราเดิมโดยมีระยะห่างทุก 3 วัน ในกรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมกันนั้น ทำการใส่ NBPT, PPD, N-(diaminiphosphinyl) benzamide (DAPT) และ acetohydroxamic acid (AHA) ทำการฉีดสารยับยั้งยูรีเอสแต่ละชนิดใช้ อัตรา 0.5%

ภายหลังการใส่ยูเรียทำการวัดอุณหภูมิและระดับความลึกของน้ำในแปลงย่อยและแปลงวงกลมทุกๆ 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 08.00 ถึง 18.00 นาฬิกา เป็นระยะเวลาติดต่อกัน 11 วัน ในเวลาเดียวกันทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 5 จุดภายในแต่ละแปลงนำไปวัด pH ทันทีด้วย glass electrode ตัวอย่างน้ำเดียวกันนั้นทำการวัดหา ammoniacal-N ด้วย ammonia electrode และ

millivolt meter (Orion 1983) และ urea-N ตามวิธีการของโดย Mulvaney and Bremner (1979)

ในแปลงวงกลมทำการวัด vertical flux density (F) ของแอมโมเนียและความเร็วลมที่พัดผ่านบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางวงกลมที่ระดับ 0.8 เมตร เหนือผิวน้ำในระหว่างเวลา 08.00-12.00, 12.00-18.00 และ 18.00-08.00 นาฬิกา โดยทำการดักจับแอมโมเนียที่ระเหยออกมาด้วย ammonia samplers (Leuning *et al.* 1985) ตามวิธีการ simplified micrometeorological technique (Wilson *et al.* 1982 ; Denmead 1983 ; Freney *et al.* 1985) ค่า flux ที่วัดได้พร้อมกับความเร็วลม (u) และ equilibrium ammonia concentration (po ซึ่งคำนวณจาก pH อุณหภูมิและ ammoniacal-N ของน้ำที่ท่วมขังดิน) สามารถนำมาสร้างสมการ (Freney *et al.* 1985 ; De Datta *et al.* 1989)

F = k.u.po

F = Bulk aerodynamic relationship

k = transfer coefficient

สมการนี้สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณการสูญเสียแอมโมเนียในแต่ละแปลงย่อยเมื่อทราบข้อมูลความเร็วลม pH อุณหภูมิและความเข้มข้นของ ammoniacal-N ในน้ำที่ท่วมขังในแปลงย่อย

ทำการเก็บเกี่ยวข้าวเพื่อวัดผลผลิตในเนื้อที่ 6.4 ตร.ม. ในแต่ละแปลงย่อย นำมานวด ฝัด อบลดความชื้น และปรับผลผลิตเมล็ดที่ระดับความชื้น 14%

ผลการทดลองและวิจารณ์

อุณหภูมิของน้ำท่วมขังดินที่บริเวณผิว (0-1 ซม.) อยู่ในช่วงระหว่าง 25 ถึง 39°ซ. โดยอุณหภูมิต่ำเกิดขึ้นในตอนเช้าและสูงสุดในตอนบ่ายและอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นในระยะสุดท้ายของการทดลอง (Fig. 1) ความเร็วลมที่พัดผ่านต้นพืชเหนือผิวน้ำ 0.8 เมตร มีค่าแตกต่างกันในช่วง 1 ถึง 3.6 เมตรต่อวินาทีโดยความเร็วในระยะแรก 2-4 วันภายหลังการใส่ปุ๋ยยูเรียสูงกว่าระยะสุดท้ายของการทดลอง (Fig. 2) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการสูญเสียแอมโมเนีย (ammonia flux density) ที่เกิดขึ้นสูงสุด (6.7 μg N $m^{-2}s^{-1}$) 2 วันหลังการใส่ยูเรียและค่อยๆ ลดลงจนเหลือต่ำสุดในวันที่ 9 (Fig. 4) การเพิ่มความเร็วลมช่วยให้อัตราการระเหยของแอมโมเนียจากนาข้าวเพิ่มสูงโดยส่งเสริมให้เกิดการเคลื่อนย้ายอย่างรวดเร็วของก๊าซ NH_3 ระเหยไปจากผิวน้ำ (Vlek and Craswell 1981)

Fig. 3 แสดงให้เห็นถึงผลของ algicide ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำท่วมขังดิน ในกรรมวิธีที่ไม่ใส่ terbutryn พบว่า pH ของน้ำแสดงรูปแบบ diurnal cycling คือ pH เพิ่มสูงขึ้นในเวลาบ่าย และลดต่ำในเวลาเช้า และเย็น ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะอันหนึ่งของดินนาซึ่งเกิดจากกิจกรรมการสังเคราะห์แสงและหายใจของสาหร่ายและพืชน้ำเล็กๆ ที่เจริญเติบโตอยู่ในน้ำ (Mikkelsen *et al.* 1978) โดย pH สูงสุดในแต่ละวันมีค่าอยู่ระหว่าง 8.7 และ 9.2 ในขณะที่ pH ต่ำสุดอยู่ใกล้กับ 8 เมื่อใส่ algicide พบว่า pH ถูกลดให้อยู่ต่ำกว่า 8 ในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรีย และระหว่างช่วงระยะเวลาดังกล่าวการเปลี่ยนแปลง pH ประจำวันสูงและต่ำไม่เกิดขึ้น หลังจากนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นแม้ว่ายังคงใส่ terbutryn ในเวลาหลัง 17.00 นาฬิกา ในวันที่ 3, 6 และ 9 หลังการใส่ยูเรียก็ตาม การใส่ algicide มีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า pH ต่ำสุดในแต่ละวัน แต่สามารถควบคุมให้ pH สูงสุดอยู่ต่ำกว่า 8.5 (Fig. 3)

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า terbutryn สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำอย่างได้ผลในระยะแรก ต่อมาสาหร่ายสามารถปรับตัวให้มีความทนทานต่อ terbutryn ในตอนหลังจึงมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนในแปลงย่อย การทดลองนี้ให้ผลเช่นเดียวกับรายงานของ Bowmer and Muirhead (1987) การใส่ NBPT ร่วมกับ algicide ลด pH ของน้ำที่ท่วมขังดินเพียงเล็กน้อยในระยะเวลา 2-3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรียเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ใส่ algicide เพียงอย่างเดียว (Fig. 5) ผลดังกล่าวเป็นไปดังที่คาดไว้ ถ้า NBPT ยับยั้งปฏิกริยาไฮโดรไลซีสของยูเรียให้

ช้าลงในสภาพที่ไม่มีสาหร่ายเจริญเติบโต pH ของน้ำท่วมขังดินควรรักษาระดับอยู่ที่ประมาณ 8 เนื่องจากการปลดปล่อยแอมโมเนียภายหลังปฏิกริยาไฮโดรไลซีสของยูเรียและ Buffering Capacity ของระบบดินนาสภาพน้ำขัง (Vlek and Craswell 1981) การใส่ CaC_2 ร่วมกับ algicide มีผลทำให้ pH ของน้ำขังดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรีย (Fig. 5, 6) การเพิ่มของ pH ในน้ำอาจเนื่องมาจากการปลดปล่อยของ $Ca(OH)_2$ เมื่อ CaC_2 ทำปฏิกริยากับน้ำ การใส่ NBPT ร่วมกับ CaC_2 และ algicide ให้ค่า pH อยู่ระหว่างกลางระหว่างกรรมวิธีที่ใส่ NBPT และ CaC_2 แยกกัน กรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมให้ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำท่วมขังดินเช่นเดียวกับกรรมวิธีที่ใส่ NBPT ไม่ว่าใส่ร่วมกับ algicide หรือใส่ร่วมกับ algicide และ CaC_2 (Fig. 6)

ในกรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N (NH_3 + NH^+_4) ในน้ำที่ท่วมขังดินอันเกิดจากปฏิกริยาไฮโดรไลซีสของยูเรียค่อยๆ เพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 14 gNm^{-3} ในวันที่ 5 ภายหลังการใส่ยูเรีย (Fig. 7) หลังจากนั้นค่อยๆ ลดปริมาณลงจนกระทั่งเกือบไม่สามารถวัดปริมาณได้ในวันที่ 11 ส่วนในกรรมวิธีที่ใส่ algicide ร่วมด้วยนั้นปริมาณของ ammoniacal-N เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 20 gNm^{-3} ในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรียและรักษาระดับใกล้เคียงกับจุดสูงสุดอีก 2 วัน ต่อมาก่อนลดปริมาณหลังจากนั้น โดยรักษาระดับใกล้เคียงหรือต่ำกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรีย โดยเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดประมาณ 20 gNm^{-3} หลังจากวันที่ 4 ปริมาณ ammoniacal-N ลดลง และรักษาระดับต่ำกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 11 (Fig. 8) ปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N ที่เพิ่มสูงขึ้นในระยะแรกของกรรมวิธีที่ใส่ CaC_2 ชี้ให้เห็นว่ากรรมวิธีการทดลองดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งปฏิกิริยา nitrification เมื่อใส่ algicide ร่วม CaC_2 ปริมาณ ammoniacal-N ในน้ำเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียร่วมกับ algicide หรือ CaC_2 อย่างใดอย่างหนึ่ง (Fig. 9) โดยให้ค่าปริมาณสูงสุดที่ 34 gNm^{-3} ใน 3 วันภายหลังการใส่ยูเรีย อย่างไรก็ตามภายหลังวันที่ 4 เมื่อกรรมวิธีที่ใส่ algicide ลดประสิทธิภาพลง ความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้น ammoniacal-N ของกรรมวิธีต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นจึงมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การใส่ NBPT เพียงครั้งเดียวร่วมกับยูเรียทำให้ปริมาณการสะสม ammoniacal-N น้อยกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียวอย่างเด่นชัดจนกระทั่งถึงวันที่ 7 ภายหลังการใส่ยูเรีย (Fig. 10) ในกรรมวิธีที่ใส่ NBPT ครั้งเดียวความเข้มข้นของ ammoniacal-N ขึ้นลงอยู่ประมาณ 4 gNm^{-3} จนกระทั่งถึงวันที่ 5 ภายหลังการใส่ยูเรีย หลังจากนั้นเพิ่มปริมาณสูงขึ้น 8 gNm^{-3} ก่อนลดลงจนเหลือปริมาณเพียงเล็กน้อยในวันที่ 11 สำหรับกรรมวิธีที่ใส่ NBPT หลายครั้งพบว่าสามารถควบคุมปฏิกริยาไฮโดรไลซีสของยูเรียให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นกว่าการใส่ NBPT เพียงครั้งเดียวนับตั้งแต่วันที่ 5 ภายหลังการใส่ยูเรีย อย่างไรก็ตามการใส่ NBPT ร่วมกับ algicide หรือ CaC_2 หรือ algicide + CaC_2 สามารถเพิ่มปริมาณ ammoniacal-N ให้สูงขึ้นกว่ากรรมวิธีที่ใส่ NBPT อย่างเด่นชัด (Fig. 11)

สำหรับกรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมมีผลให้ปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N ในน้ำเช่นเดียวกับตำรับที่ใส่ NBPT เพียงอย่างเดียวแม้ว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อใส่ร่วมกับ algicide และ CaC_2 หรือทั้งสอง (Fig. 11, 12) เมื่อเปรียบเทียบการใส่ NBPT เพียงครั้งเดียวกับการใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมเมื่อใส่ร่วมกับ algicide และ CaC_2 พบว่าตำรับทั้งสองไม่แสดงความแตกต่างกันในปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N ในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรีย (Fig. 13) หลังจากนั้นการใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมลดปริมาณการสะสมของ ammoniacal-N ในน้ำได้น้อยกว่ากรรมวิธีที่ใส่ NBPT เพียงครั้งเดียว ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใส่ PPD ในวันที่ 3 ภายหลังการใส่ยูเรียช่วยลดอัต

Table 2. Effect of inhibitor treatments on amonia loss and grain yield of flooded rice at Suphanburi (wet season 1991).

Treatment	Ammonia loss (% of applied N)		Grain yield (kg rai^{-1})	
	- Algicide	+ Algicide	- Algicide	+ Algicide
Control(1) (Urea only)	20.5	10.2	571.2	640.0
NBPT	9.9	7.6	675.2	619.2
NBPT repeated	9.9	-	680.0	-
Mixed inhibitors	9.5	7.1	667.2	745.6
Calcium carbide (CaC_2)	15.2	12.4	649.6	644.8
NBPT + CaC_2	14.6	14.7	576.0	676.8
Mixed inhibitors + CaC_2	14.5	13.1	625.6	542.4
LSD (P = 0.05)	4.3		97.6	

(1) All treatments listed received 12 kg N rai^{-1}. The plots without added N yielded 435.2 kg rai^{-1}

ราไฮโดรไลซีสของยูเรียให้ล่าช้าลงในกรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสม

Fig. 14 แสดงปริมาณความเข้มข้นของยูเรียในน้ำที่ท่วมขังดินลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นภายหลังการใส่ยูเรียซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองการเปลี่ยนแปลงของยูเรียในนาข้าวสภาพน้ำขัง (Cai *et al.* 1989; Phongpan and Byrnes 1990) ในกรรมวิธียูเรียที่ไม่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสพบว่าไม่สามารถวัดปริมาณ urea-N ที่เหลืออยู่ในน้ำได้ในวันที่ 7 ภายหลังการใส่ยูเรีย การใส่ NBPT ไม่ว่าครั้งเดียวหรือหลายครั้งหรือรวมเข้ากับสารยับยั้งยูรีเอสผสมมีผลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการไม่ปรากฏตัวของยูเรียในน้ำแม้ว่ายูเรียเหลืออยู่ในน้ำในกรรมวิธีการทดลองดังกล่าวในวันที่ 11 ในกรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมร่วมกับ algicide พบว่าปริมาณของยูเรียที่ใส่ลงไปคงเหลืออยู่ 9% ในน้ำที่ท่วมขังเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 11) อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของยูเรียที่เหลือในน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากปฏิกริยาไฮโดรไลซีสของยูเรีย อาทิ ต้นข้าว วัชพืช และสาหร่ายสามารถดูดซึมยูเรียโดยตรง จุลินทรีย์นำไปใช้ (microbial immobilization) หรือเคลื่อนย้ายลงไปในชั้นดิน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะประเมินประสิทธิภาพของกรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสโดยพิจารณาจากปริมาณความเข้มข้นของยูเรียที่เหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดินแต่เพียงอย่างเดียว

Table 2 แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียแอมโมเนียในแปลงย่อยเกิดขึ้น 20.5% ของปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ลงไปในกรรมวิธียูเรียที่ไม่ใส่สารยับยั้งการสูญเสียไนโตรเจน การใส่ algicide ลดปริมาณการสูญเสียแอมโมเนียให้เหลือเพียง 10.2% โดยไม่แตกต่างจากตำรับที่ใส่สารยูรีเอสไม่ว่าจะเป็นใส่เพียงครั้งเดียวหรือใส่หลายครั้ง หรือใส่ผสมซึ่งให้ค่าการสูญเสีย 9.9, 9.9 และ 9.5% ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามการใส่ CaC_2 มีผลทำให้การสูญเสียแอมโมเนียเกิดขึ้นมากกว่ากรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสไม่ว่าใส่เพียงอย่างเดียวหรือร่วมกับสารยับยั้งการสูญเสียไนโตรเจนอื่นๆ โดยเฉลี่ยแล้วการสูญเสียแอมโมเนียในกรรมวิธีที่ใส่ CaC_2 มีปริมาณ 14.1% ของไนโตรเจนที่ใส่ลงไป กรรมวิธีที่มีการสูญเสียแอมโมเนียน้อยที่สุดคือกรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสม ซึ่งสามารถลดการสูญเสียให้เหลือเพียงแค่ 7% การสูญเสียแอมโมเนียในปริมาณน้อยไม่จำเป็นต้องหมายความว่ากรรมวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงทั้งนี้เพราะไนโตรเจนที่ไม่สูญหายไปโดยการระเหยของแอมโมเนียเพราะใส่สารยังยั้งยูรีเอสเมื่อเหลืออยู่ในน้ำที่ท่วมขังดินอาจถูก nitrified และสูญเสียไปโดยกระบวนการ denitrification

เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตข้าว (Table 2) พบว่ากรรมวิธีที่ใส่ NBPT เพียงครั้งเดียวหรือใส่ NBPT

หลายครั้ง หรือใส่ NBPT ร่วมกับ algicide และ CaC_2 หรือใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมร่วมกับ algicide ให้ผลผลิตสูงกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว กรรมวิธีที่ใส่ผลผลิตเพิ่มขึ้นสูงสุดได้แก่กรรมวิธีที่ใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมร่วมกับ algicide ซึ่งให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 31% ($P<0.05$) และสูญเสียแอมโมเนียน้อยที่สุด (7.1%)

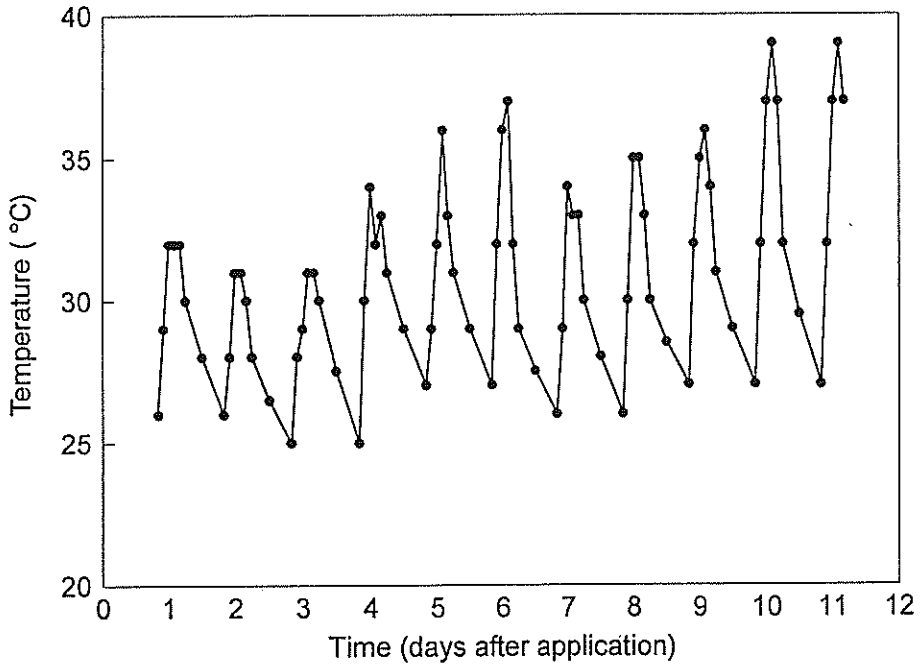

Fig. 1. Average temperature of floodwater, 0.01 m below the surface, in the experimental plots and circular area.

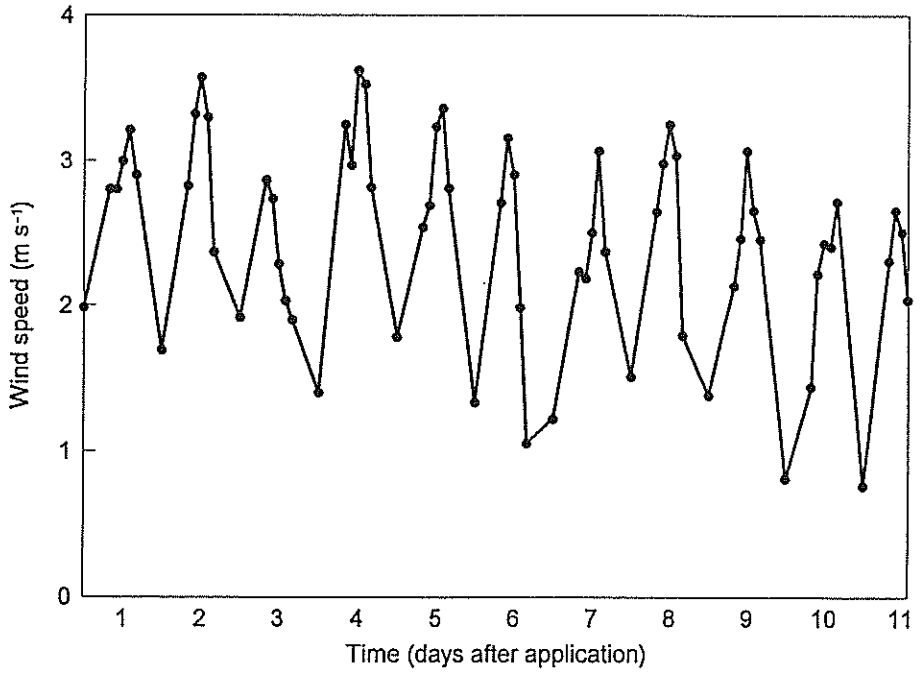

Fig. 2. Wind speeds 0.8 m above floodwater during the experimental period.

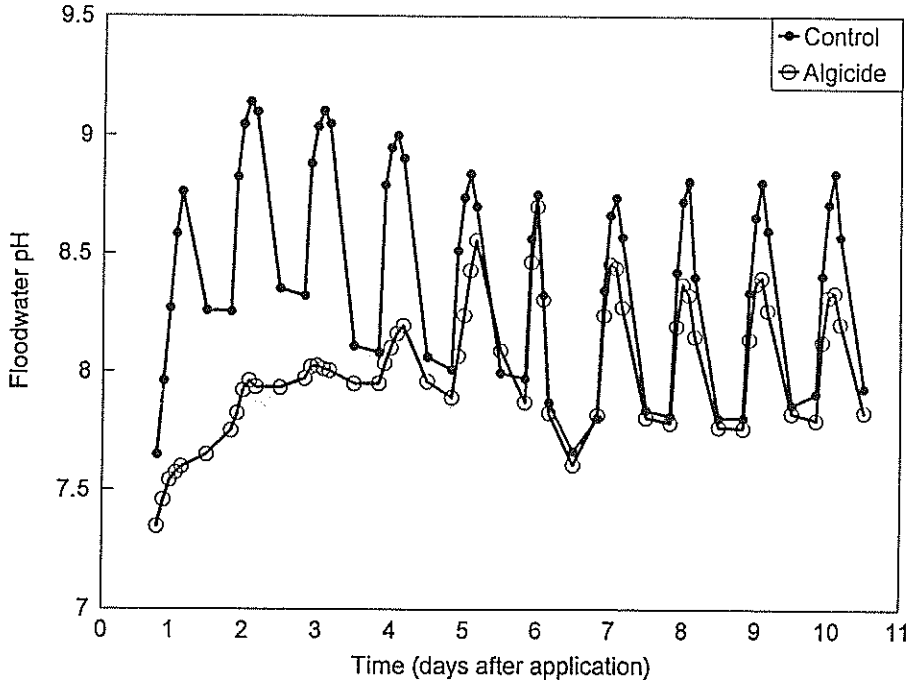

Fig. 3. Floodwater pH as affected by applications of the algicide terbutryn.

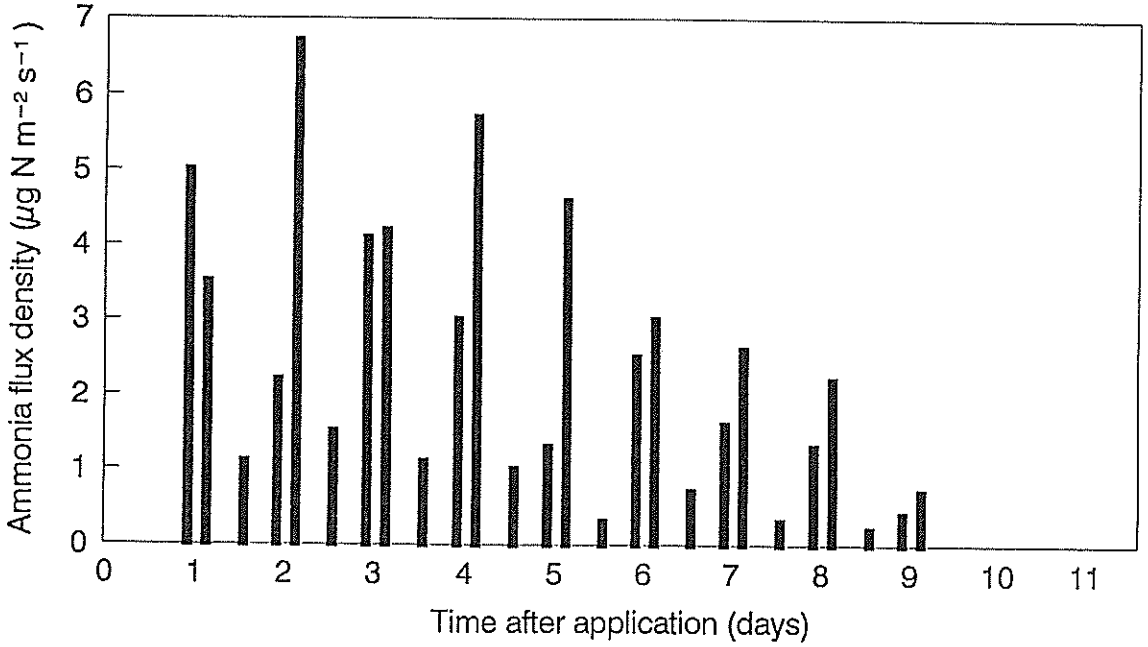

Fig. 4. Ammonia flux density from the 25 m radius circular area at Suphan Buri after urea application (July 1991).

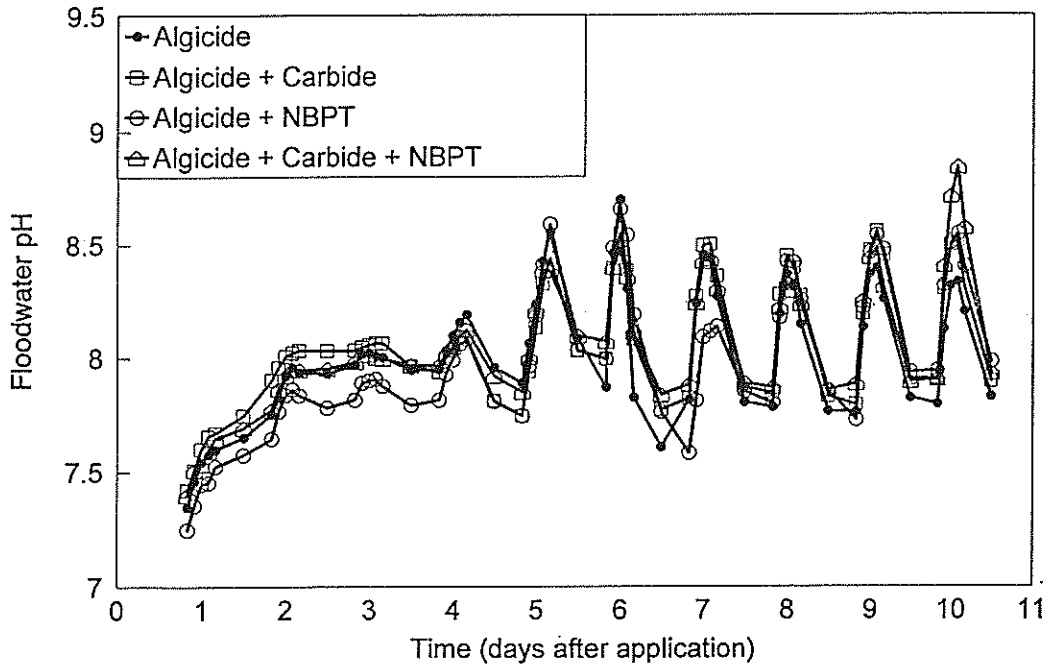

Fig. 5. Floodwater pH as affected by algicide, calcium carbide and NBPT.

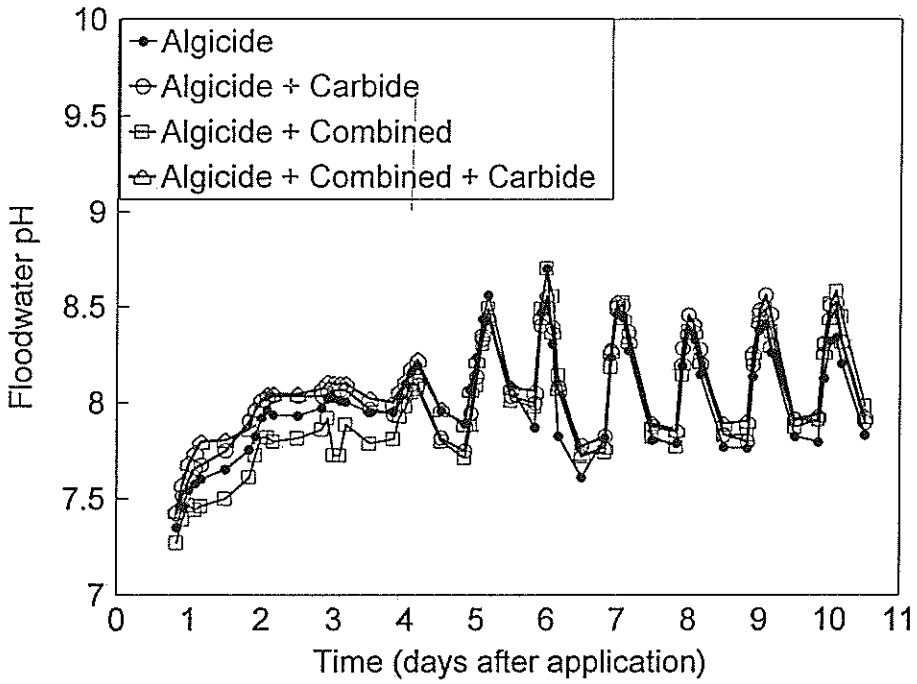

Fig. 6. pH of floodwater as affected by algicide, calcium carbide and combined inhibitors.

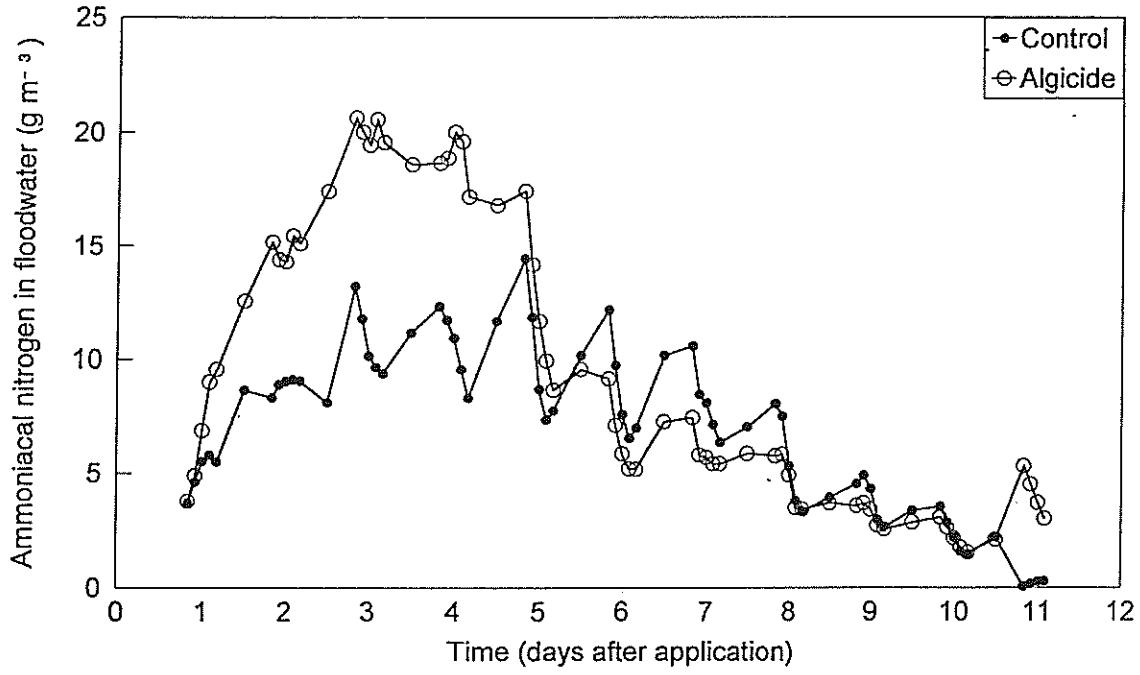

Fig. 7. Ammoniacal nitrogen in floodwater as affected by algicide.

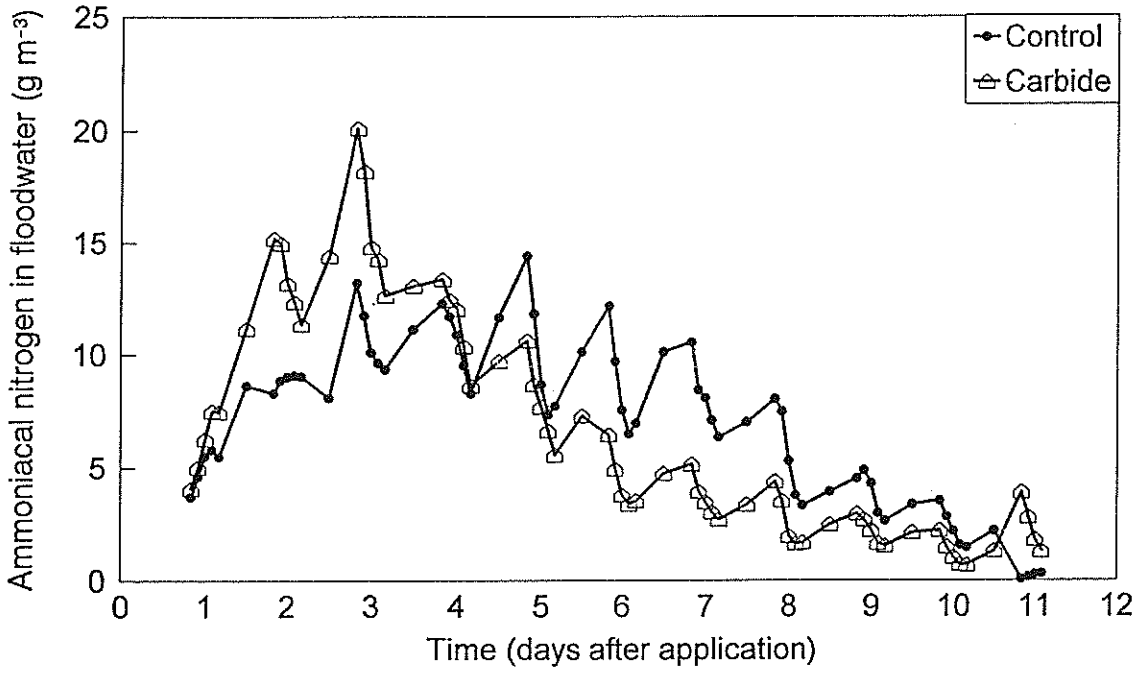

Fig. 8. Ammoniacal nitrogen in floodwater as affected by calcium carbide.

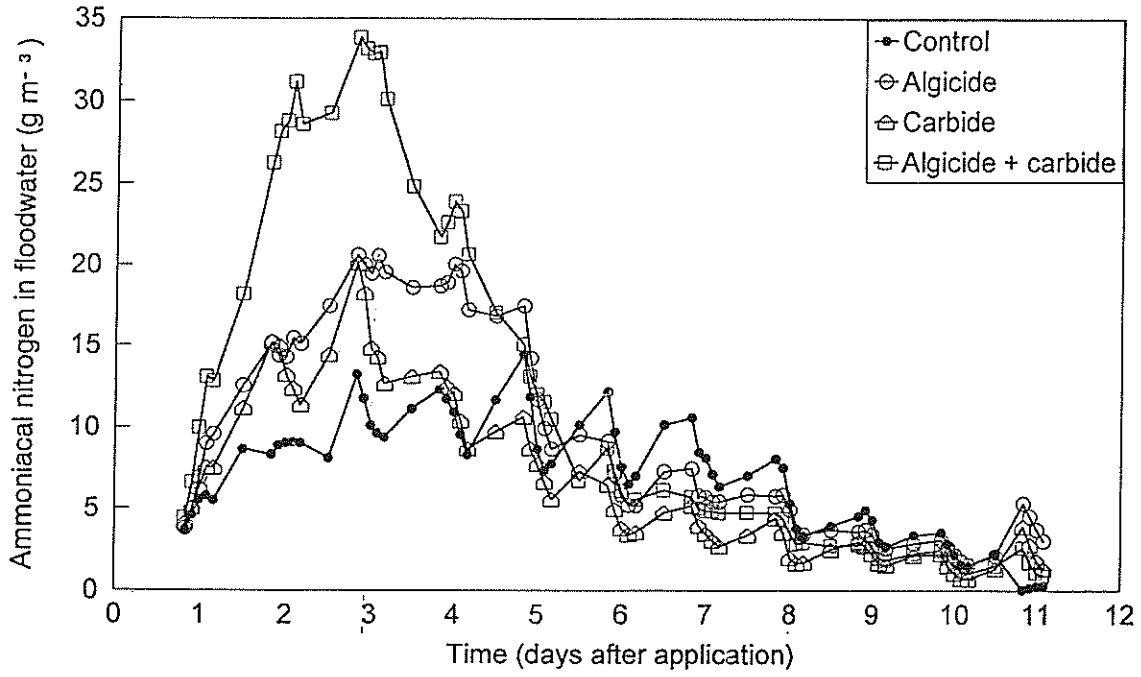

Fig. 9. Effect of algicide and calcium carbide on ammoniacal nitrogen in the floodwater.

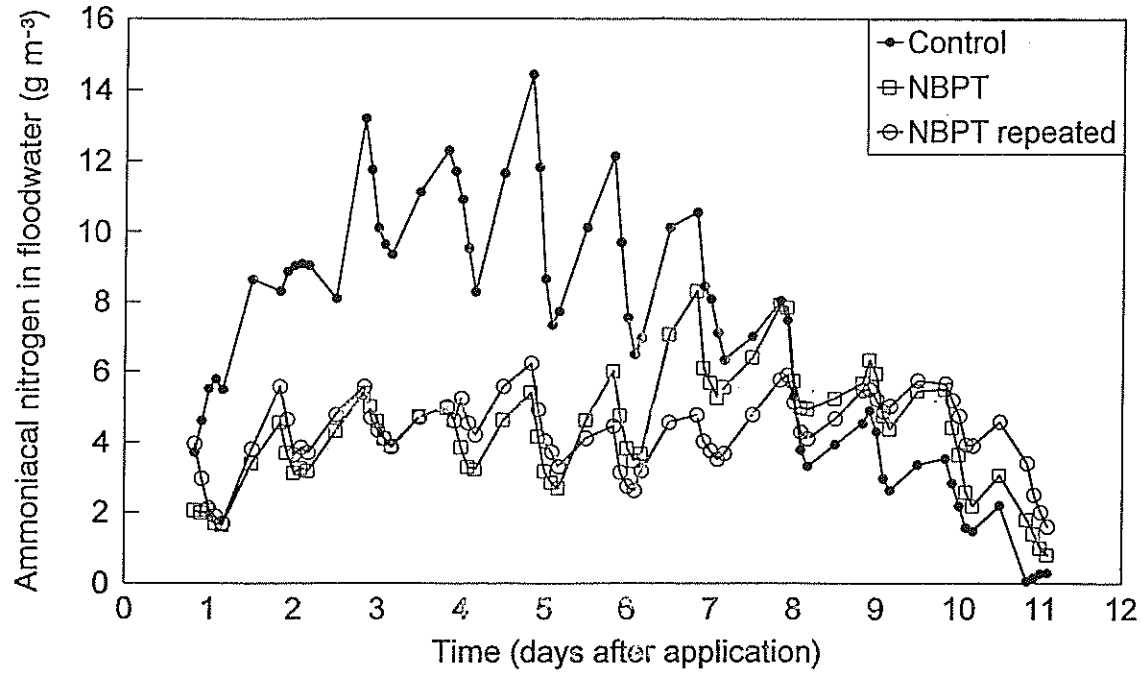

Fig. 10. Effect of single and multiple applications of NBPT on ammoniacal nitrogen concentrations in the floodwater.

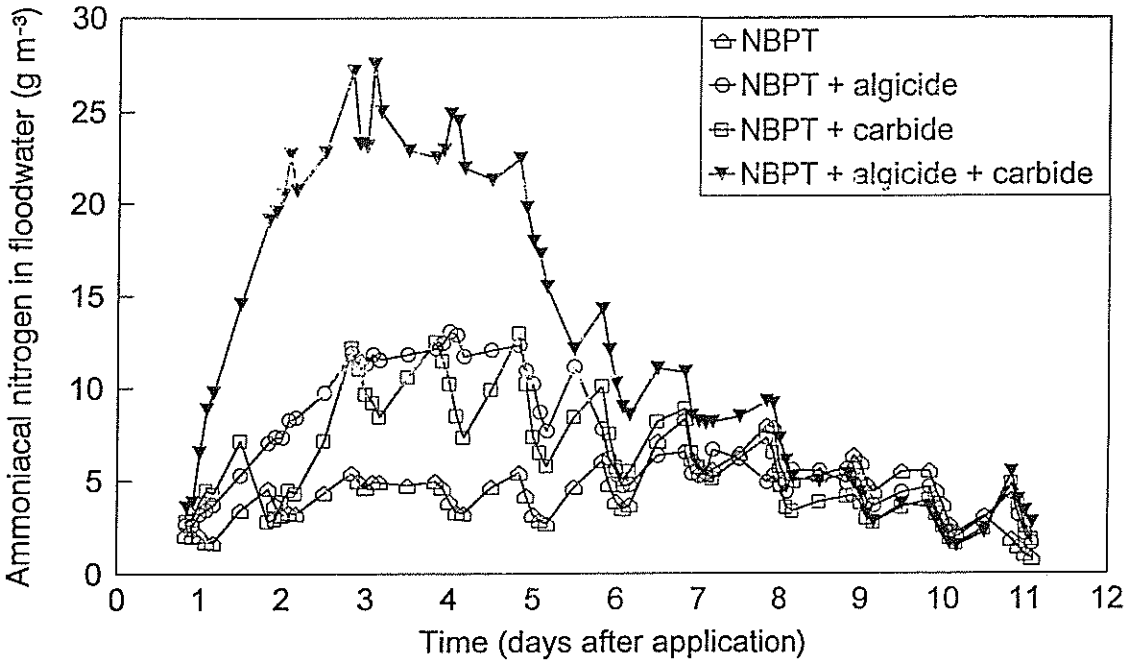

Fig. 11. Ammoniacal nitrogen concentration in floodwater as affected by NBPT, algicide and calcium carbide.

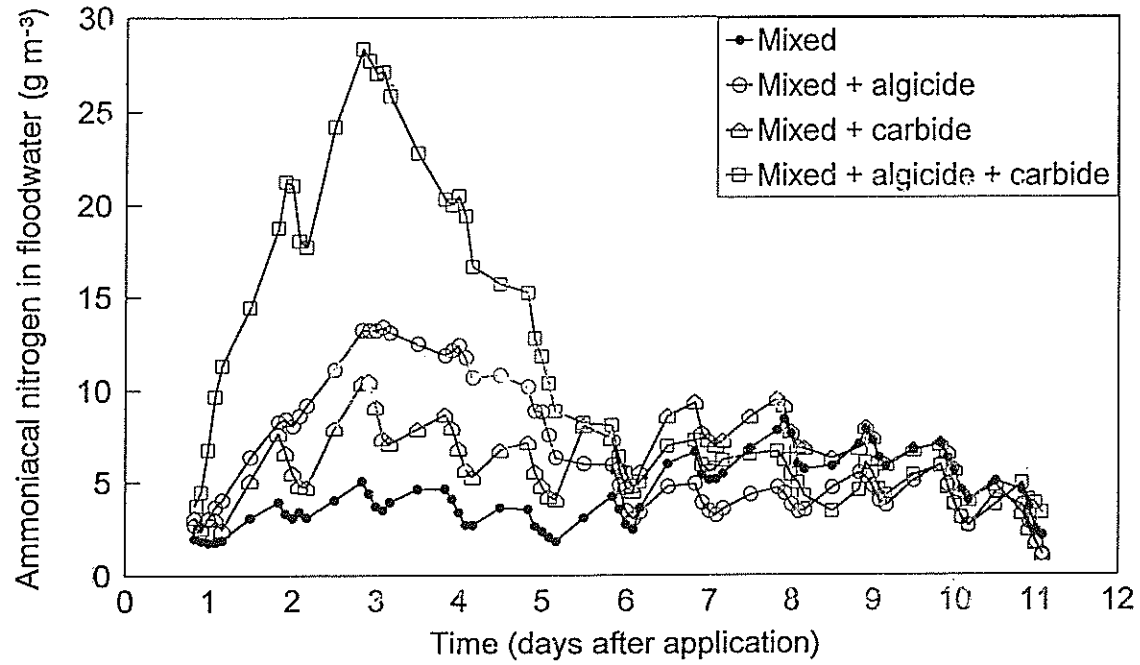

Fig. 12. Ammoniacal nitrogen in floodwater as affected by mixed urease inhibitors, algicide and calcium carbide.

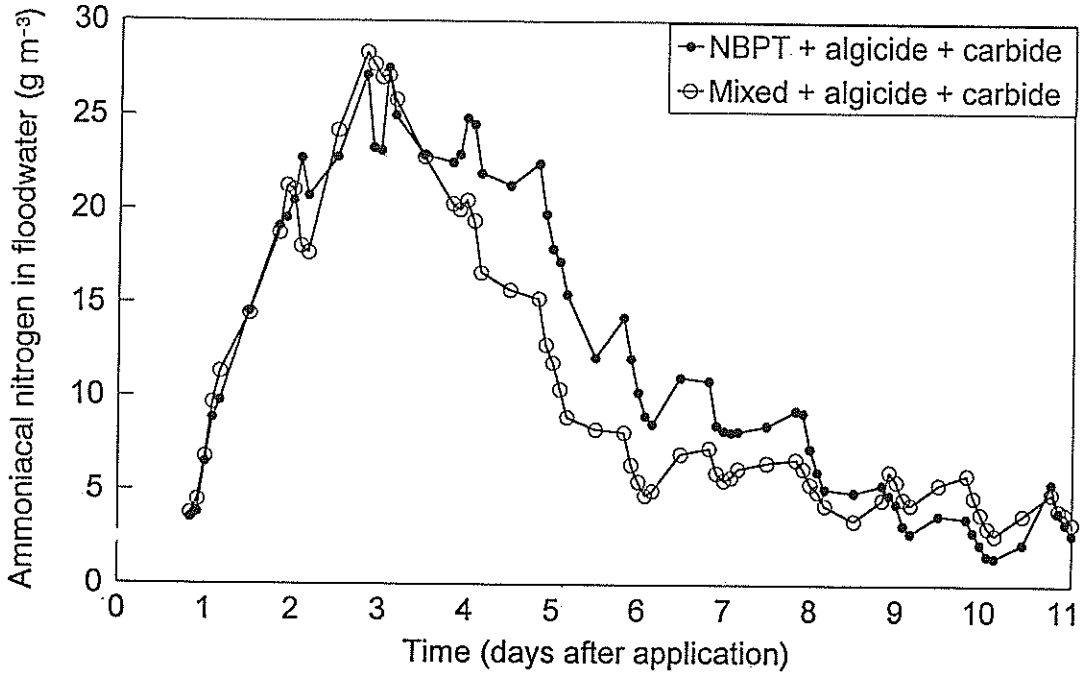

Fig. 13. Comparison of NBPT and mixed urease inhibitors in the presence of algicide and carbide.

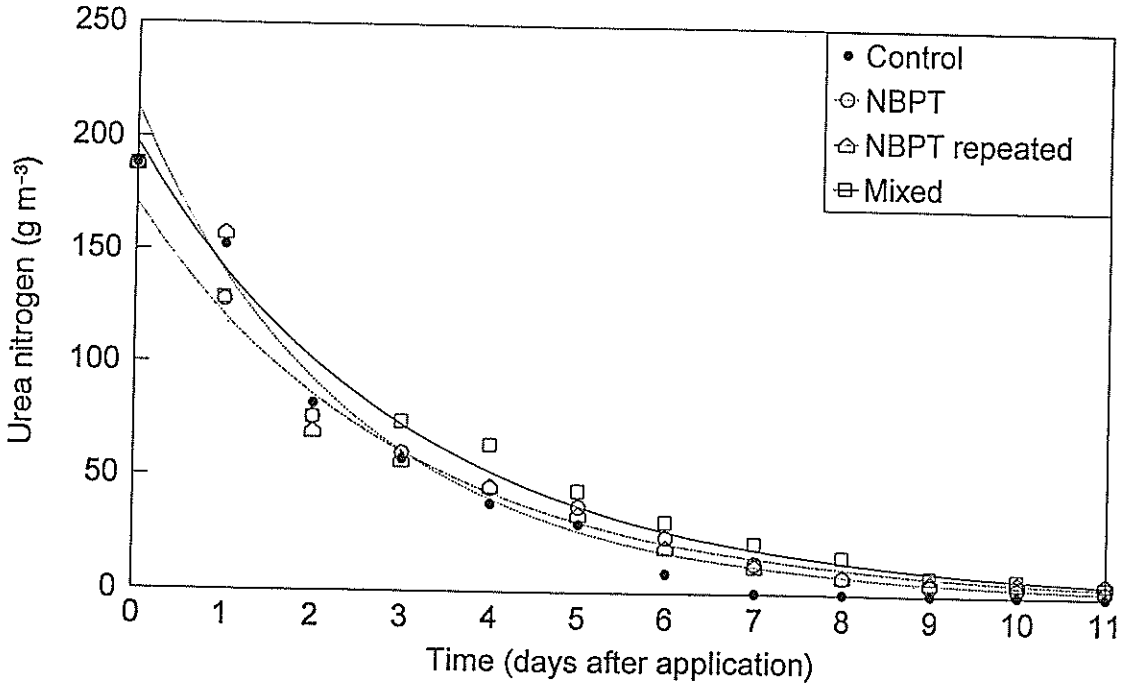

Fig. 14. Effect of NBPT and mixed urease inhibitors on urea hydrolysis.

สรุปผลการทดลองและคำแนะนำ

การใส่ algicide สามารถลด pH ของน้ำที่ท่วมขังดินให้อยู่ต่ำกว่า 8.5 ในระยะ 3 วันแรกภายหลังการใส่ยูเรียและเพิ่มปริมาณการสะสม ammoniacal-N ให้สูงกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว การใส่ CaC_2 ร่วมกับยูเรียเพิ่มปริมาณ ammoniacal-N ในอัตราที่เร็วกว่ากรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว ในทางตรงกันข้ามการใส่ NBPT ร่วมกับยูเรียไม่ว่าใส่เพียงครั้งเดียวหรือหลายครั้งสามารถลดปริมาณการสะสม ammoniacal-N ได้มากกว่า 50% NBPT สามารถยับยั้งยูรีเอสผสมโดยมีช่วงระยะเวลาห่างกัน 3 วันให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใส่ NBPT เพียงครั้งเดียว การใส่สารยับยั้งยูรีเอสร่วมกับยูเรียให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใส่ algicide ร่วมอยู่ด้วย

CaC_2 ยับยั้งปฏิกิริยา nitrification จึงอาจมีผลต่อการสูญเสียแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ CaC_2 ให้มีประสิทธิภาพสูงในการลดการสูญเสียไนโตรเจนโดยกระบวนการสูญเสียแอมโมเนีย และ denitrification จึงควรใส่ปุ๋ยยูเรียลึกลงใต้ผิวดิน หรือคลุกเคล้าให้จมดิน (Keerthisinghe *et al.* 1983) เพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของ ammoniacal-N ให้เหลือน้อยในน้ำที่ท่วมขังดิน การใส่สารยับยั้งยูรีเอสผสมร่วมกับ algicide ให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 31% (745.6 กก. ต่อไร่) และลดการสูญเสียแอมโมเนียจาก 20.5 เหลือเพียง 7.1% ของปริมาณที่ใส่เพื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ใส่ยูเรียเพียงอย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

Austin ER, Bradford TJ, Lupin M. 1984. High performance liquid chromatographic determination and hydrolysis studies of phenyl phosphorodiamidate, a urease inhibitor. J Agr Food Chem 32 : 1090-1096.

Banerjee NK, Mosier AR. 1989. Coated Calcium carbide as a nitrification inhibitor in upland and flooded soils. J Indian Soc Soil 37 : 306-313.

Bowmer KH, Muirhead WA. 1987. Inhibition of algal photosynthesis to control pH and reduce ammonia volatilization from rice floodwater. Fert Res 13 : 13-29.

Bronson KF and Mosier AR. 1991. Effect of encapsulated calcium carbide on dinitrogen, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide emissions from flooded rice. Biol Fertil Soils 11 : 11-20.

Buresh RJ, De Datta SK, Samson MI, Phongpan S, Snitwongse P, Fagi AM, Tejaswana R. 1991. Dinitrogen and nitrous oxide flux from urea basally applied to puddled rice soils. Soil Sci Soc Am J 55 : 268-273.

Buresh RJ, De Datta SK. 1990. Denitrification losse from puddled rice soils in the tropics. Biol Fert Soils 9 : 1-13.

Buresh RJ, De Datta SK, Padilla JL, Chua TT. 1988 a. Potential of inhibitors for increasing response of lowland rice to urea fertilization . Agron J 80 : 947-952.

Buresh RJ, De Datta SK, Padilla JL, Samson MI. 1988b. Field evaluation of two urease inhibitors with transplanted lowland rice. Agron J 80 : 763-768.

Cai GX, Zhu ZL, Trevitt ACF, Freney JR, Simpson JR. 1986. Nitrogen loss from ammonium bicarbonate and urea fertilizers applied to flooded rice. Fert Res 10: 203-215.

Cai GX, Freney JR, Muirhead WA, Simpson JR, Chen DL, Trevitt ACF. 1989. The evaluation of urease inhibitors to improve the efficiency of urea as a N-source for flooded rice. Soil Bilo Biochem 21: 137-145.

Chai H S, Bremner JM, McCarty GW. 1988. Effect of N-(n-butyl) thiophosphorie triamide on hydrolysis of urea by plant, microbial and soil ureases. Agron Abs 213.

Greason GL, Schmitt MR, Douglass EA, Hendrickson LL. 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 SK, Buresh RJ. 1989. Integrated nitrogen management in irrigated rice. Adv Soil Sci 10: 143-169.

De Datta SK, Trevitt ACF, Freney JR, Obcemea WN, Real JG, Simpson JR. 1989. Measuring nitrogen losses from

lowland rice using bulk aerodynamic and nitrogen-15 balance methods. Soil Sci Soc Am J 53:1275-1281.

Denmead OT. 1983. Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field. *In:* Freney JR, Simpson JR (eds). Gaseous loss of nitrogen from plant soil systems. Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers, the Hangue, pp 133-157.

Fillery IRP, De Datta SK. 1986. Ammonia volatilization from nitrogen sources applied to rice fields:1 Methodology, ammonia fluxes, and nitrogen-15 loss. Soil Sci Soc Am J 50:80-86.

Fillery IRP, Vlek PLG. 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. Fert Res 9: 79-98.

Fillery IRP, Simpson JR, De Datta SK. 1984. Influence of field environment and fertilizer management on ammonia loss from flooded soil. Soil Sci Soc Am J 48: 914-92.

Fillery IRP, Simpson JR, De Datta SK. 1986. Contribution of ammonia volatilization to total nitrogen loss after application of urea to wetland rice fields. Fert Res 8: 193-202.

Freney JR, Denmead OT, Watanabe I, Crawell ET. 1981. Ammonia and nitrous oxide losses following application of ammonium sulfate to flooded rice. Aust J Agric Res 32: 37-45.

Freney JR, Leuning R, Simpson JR, Denmead OT and Muirhead WA. 1985. Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified techniques. Soil Soil Sci Soc Am J 49: 1049-1054.

Freney JR, Trevitt ACF, De Datta SK, Obcamea WN, Real JG. 1990. The interdependence of ammonia volatilization and denitrication as nitrogen loss processes in flooded rice in the Philippines. Biol Fertil Soils 9: 31-36.

Freney JR, Trevitt ACF, Muirhead WN. 1988. Effect of water-depth on ammonia loss from lowland rice. Fert Res 16: 97-107.

Keerthisinghe DG, Freney JR, Mosier AR. 1993. Effect of wax-coated calcium carbide and nitryprin on nitrogen loss and methane emission from dry-seeded flooded rice. Biol Fertil Soils (in press)

Leuning R, Freney JR, Denmead OT, Simpson JR. 1985. A sampler for measuring atmospheric ammonia flux. Atmos Environ 18: 1583-1592.

Martens DA, Bremner JM. 1984. Effectiveness of phosphoroamides for retardation of urea hydrolysis in soils. Soil Sci Soc Am J 48: 302-305.

Mikkelsen DS, De Datta SK, Obcemea WN. 1978. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. Soil Sci Soc Am J 42: 725-730.

Mosier AR, Champman SL, Freney JR. 1989. Determination of dinitrogen emission and retention in floodwater and porewater of a low land rice field fertilized with 15N-urea. Fert Res 19:127-136.

Mulvaney RL, Bremner JM. 1979. A modified diacetylmonaxime 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. Orion Research Inc Cambridge Mass.

Phongpan S, Byrnes BH. 1990. The effect of the urease inhibitor N-(n-buty) thiophosphoric triamice on the efficiency of urea application in a flooded rice field trial in Thailand. Fert Res 25: 145-151.

Rodgers GA. 1983. Effect of dicyandiamide on ammonia volatilization from urea in soil. Fert Res 4: 361-367.

Simpson JR, Freney JR. 1988. Interacting processes in gaseous nitrogen loss from urea applied to flooded rice fields. *In:* Pushoparajah E, Husin A, Bachik AT(eds) Int Symp on Urea Technol and Utilization. Malaysian Society of Soil Science, Kualar Lumpur, pp 281-290.

Simpson JR, Freney JR, Wetselaar R, Muirhead WA, Leuning R, Denmead OT. 1984. Transformations and losses of urea nitrogen after application to flooded rice. Aust J Agric Res 35: 189-200.

Simpson JR., Freney JR, Muirhead WA, Leuning R. 1985. Effects of phenylphosphorodiamidate and dicyandiamide on nitrogen loss from flooded rice. Soil Sci Soc Am J 49: 1428-1431.

SMSS. 1983. Keys to Soil Taxonomy. Soil Management Support Services, Technical Monograph No. 8 United States Department of Agriculture. US Government Printing Office : Washington.

Vlek PLG, Byrnes BH. 1986. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice. Fert Res 9: 131-147.

Vlek PLG, Craswell ET. 1981. Ammonia volatilization from flooded soils. Fert Res 2: 227-245.

Wilson JD, Thurtell GW, Kidd GE, Beauchamp EG (1982) Estimation of the rate of gaseous mass transfer from a surface source plot to the atmosphere. Atmos Environ 16: 186-187.

Zhu ZL. 1982. Efficient management of nitrogen fertilizers for flooded rice in relation to nitrogen transformations in flooded soils. Pedophere 2: 97-114.

Zhu ZL, Cai GX, Simpson JR, Zhang SL, Chen DL, Jackson AV, Freney JR. 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.

Zhu ZL, Chen RY, Xu YH. 1979. The effect of forms and methods of placement of fertilizers on the characteristics of the nitrogen supply in paddy soils. Acta Pedol Sin 16: 218-223.