Analisis Mekanistik Komprehensif Pembentukan Nano Urea Melalui Sintesis Termal Ringan Berbantuan Trisodium Sitrat

Pendahuluan dan Urgensi Teknis Pupuk Nano

Efisiensi penggunaan nitrogen (nitrogen use efficiency/NUE) pada pupuk urea konvensional di sektor pertanian global saat ini sangat memprihatinkan, dengan nilai rata-rata yang jarang melampaui 30% hingga 35% di bawah kondisi lapangan.[1] Rendahnya efisiensi ini disebabkan oleh sifat urea prill konvensional yang sangat mudah larut dalam air, yang memicu hidrolisis enzimatik secara instan oleh enzim urease tanah menjadi amonium (NH_4^+) hanya dalam waktu 24 hingga 48 jam setelah diaplikasikan.[2] Amonium bebas ini kemudian mengalami oksidasi biologis secara cepat oleh mikroorganisme tanah menjadi nitrit (NO_2^-) dan nitrat (NO_3^-) melalui jalur nitrifikasi.[2] Akibatnya, sebagian besar nitrogen hilang ke lingkungan melalui pencucian nitrat (leaching) ke air tanah, volatilisasi gas amonia (NH_3) ke atmosfer, serta denitrifikasi anaerobik yang menghasilkan gas dinitrogen oksida (N_2O), sebuah gas rumah kaca yang sangat kuat.[2]

Sebagai solusi revolusioner terhadap degradasi lingkungan dan kerugian ekonomi tersebut, nanoteknologi menawarkan rancangan pupuk masa depan berupa nano urea.[6] Nano urea dicirikan oleh ukuran partikel ultra-kecil yang berkisar antara 20 hingga 50 nm.[4] Karakteristik fisik berskala nano ini menghasilkan rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi—mencapai hingga 10.000 kali lipat dibandingkan dengan satu prill urea konvensional.[8] Ketika diaplikasikan secara foliar (penyemprotan daun), dimensi ultra-kecil ini memfasilitasi penetrasi nitrogen secara langsung dan efisien melalui stomata daun atau kutikula tanaman.[9] Hal ini meningkatkan penyerapan nitrogen secara signifikan dan memungkinkan penyimpanan nutrisi di dalam vakuola tanaman untuk dilepaskan secara perlahan sesuai kebutuhan fisiologis tanaman.[9]

Tabel 1: Perbandingan Parameter Kinerja Agronomis dan Dampak Lingkungan

+------------------------------+------------------------------+------------------------------+

Parameter	Nano Urea Berbantuan Sitrat	Urea Prill Konvensional
Ukuran Partikel Dominan	20 - 50 nm [9, 10]	1.0 - 2.5 mm [8, 13]
Efisiensi Penggunaan (NUE)	> 80% [10]	30% - 35%
Retensi Nitrogen dalam Tanah	Pelepasan lambat (>30 hari) [14, 15]	Hidrolisis instan (1-2 hari)
Risiko Pencucian (Leaching)	Berkurang hingga 55% [[6], [33]]	Sangat tinggi (40% - 70% loss) [16]
Kehilangan Volatilisasi NH3	Sangat rendah karena rilis terkendali [2, 10]	Tinggi akibat lonjakan pH tanah lokal [2, 10]
Kebutuhan Dosis Lapangan	Kurang dari 50% urea prill [17, 18]	100% dosis rekomendasi penuh [4, 7]

Peran Struktural dan Karakteristik Precursor

Keberhasilan pembentukan nano urea melalui prosedur pencampuran termal ringan ini sangat ditentukan oleh sifat struktural intrinsik dan interaksi kimiawi spesifik dari dua molekul precursor utama: urea dan trisodium sitrat.[19]

Tabel 2: Karakteristik Fisikokimia dan Peran Kimiawi Precursor Utama

Properti	Urea	Trisodium Sitrat	Signifikansi dalam Sintesis Nano Urea
Rumus Kimia	$CO(NH_2)_2$	$Na_3C_6H_5O_7$	Donor/Akseptor ikatan hidrogen [20]
Berat Molekul	60.06 g/mol	258.07 g/mol	Menentukan rasio stoikiometri reaksi
Gugus Fungsi Kunci	Karbonil (C=O), Amina (-NH2)	Karboksilat (-COO-), Hidroksil (-OH)	Situs pembentukan kompleks koordinasi & jembatan ikatan hidrogen
Titik Leleh Murni	133 °C	> 300 °C (Terdekomposisi)	Menurun drastis saat dicampur membentuk sistem eutektik

| Peran Kimiawi Utama | Precursor Inti | Agen Capping & | Menyuplai nitrogen dan membatasi ukuran |
| | (Sumber Nitrogen) | Inhibitor Nukleasi | partikel agar tidak aglomerasi [19, 22] | [22]] |
+---------------------+------------------+------------------+--+

1. Struktur Molekul Urea sebagai Precursor Inti

Urea ($CO(NH_2)_2$) adalah senyawa organik polar yang memiliki satu gugus karbonil ($C=O$) bertindak sebagai akseptor ikatan hidrogen yang kuat karena elektronegativitas tinggi pada atom oksigen yang memiliki dua pasang elektron sunyi.[19] Di kedua sisi gugus karbonil, terdapat dua gugus amina ($-NH_2$) planar yang bertindak sebagai donor ikatan hidrogen yang sangat efektif melalui atom hidrogennya yang bermuatan parsial positif.

Dalam keadaan padat murninya, molekul-molekul urea tersusun rapat dalam kisi kristal tetragonal yang distabilkan oleh jaringan ikatan hidrogen antarmolekul $N-H\cdots O$ secara tiga dimensi. Tanpa adanya agen penghambat eksternal, molekul urea dalam fasa cair atau larutan jenuh akan saling berasosiasi secara cepat melalui interaksi orientasi dipolar ini, memicu nukleasi kristal tak terkendali yang tumbuh menjadi kristal makroskopis berbentuk jarum yang rapuh dan sangat mudah larut kembali.[22]

2. Struktur Molekul Trisodium Sitrat sebagai Agen Capping dan Inhibitor

Trisodium sitrat ($Na_3C_6H_5O_7$) adalah garam natrium dari asam sitrat, sejenis asam trikarboksilat.[19] Secara struktural, molekul ini memiliki tiga gugus karboksilat ($-COO^-$) yang terionisasi penuh dalam media berair atau lelehan terhidrasi, serta satu gugus hidroksil ($-OH$) yang terikat pada atom karbon tersier pusat.[19] Kehadiran tiga gugus karboksilat bermuatan negatif ini memberikan kerapatan muatan elektrostatik lokal yang sangat tinggi.

Dalam sintesis nano urea, trisodium sitrat mengemban peran ganda yang sangat vital [19]:

- **Inhibitor Nukleasi dan Agen Capping (Penudung):** Gugus karboksilat yang kaya elektron berinteraksi secara kuat dengan gugus amina pada urea melalui ikatan hidrogen multipel.[20] Interaksi ini mengganggu orientasi reguler molekul urea dalam membentuk kisi kristal makroskopis.[22] Dengan bertindak sebagai agen penudung (capping agent), sitrat membungkus kluster-kluster molekul urea awal (embrio kristal), menciptakan penghalang sterik dan elektrostatik yang menghentikan pertumbuhan kristal lebih lanjut pada skala nanometer.[22]
- **Penghambat Nitrifikasi (Nitrification Inhibitor) Fisiologis:** Karakteristik struktural sitrat

memungkinkannya bertindak sebagai ligan pengkelat polidentat yang sangat kuat terhadap kation logam tanah, khususnya ion tembaga (Cu^{2+}).[24] Karena ion Cu^{2+} merupakan kofaktor esensial bagi enzim amonia monooksigenase (AMO) yang mengkatalisis tahap pertama nitrifikasi dalam bakteri tanah, pengkelatan Cu^{2+} oleh sitrat secara efektif menginaktivasi enzim tersebut, sehingga menghambat konversi amonium menjadi nitrat yang mudah tercuci.[3]

Analisis Detil Tahapan Prosedur Pembentukan Nano Urea

Prosedur pembentukan nano urea dari campuran padat urea dan trisodium sitrat melibatkan serangkaian transisi fasa, fenomena termodinamika, dan kinetika nukleasi kristal yang spesifik pada setiap tahapannya.[19]

Tabel 3: Tahapan Operasional Sintesis Nano Urea dan Fenomena Kimia Terkait

Tahap	Operasi Prosedur	Kondisi Fisik	Transisi Fasa & Fenomena Kimiawi
1	Pencampuran padat-padat urea (0.30 g) & sitrat (0.86 g)	Suhu Kamar (25 °C), Pengadukan mekanis	Pembentukan antarmuka reaksi pra-nukleasi, gangguan awal kisi kristal.[19, 22]
2	Pemanasan bertahap (gradual) hingga 90 °C	Kenaikan suhu gradual menuju 90 °C	Terjadinya depresi titik eutektik lelehan, peningkatan mobilitas molekul dalam fasa cair transisi.
3	Penahanan termal isotermal selama 1 jam	Suhu konstan 90 °C, durasi 1 jam	Perakitan mandiri kluster nano urea, inhibisi pertumbuhan kristal oleh capping sitrat.[19, 22, 27]

4	Transisi optik akhir	Pendinginan, larutan	Hamburan Tyndall oleh nanopartikel stabil
	menjadi warna abu-abu (ash)	fasa koloid mantap	dan pembentukan produk oligomerik berwarna
			abu-abu.[7, 20, 21]

Tahap 1: Pencampuran Homogen Precursor dalam Beaker

Pada tahap awal, sebanyak $0.30\ \text{g}$ urea ($5.00\ \text{mmol}$) dicampurkan dengan $0.86\ \text{g}$ trisodium sitrat ($2.92\ \text{mmol}$ jika dihitung sebagai bentuk dihidrat yang umum digunakan) di dalam beaker kaca bersih pada suhu ruang.[19] Rasio stoikiometri molar antara urea dan trisodium sitrat adalah sekitar $1.7 : 1$.[19]

Secara fisikokimia, pencampuran padat-padat ini menghasilkan kontak antarmuka yang sangat intim antara kedua fasa kristalin tersebut. Meskipun belum terjadi reaksi kimia kovalen yang signifikan pada suhu kamar, gaya gesek mekanis dan higroskopsitas alami urea mulai menarik kelembapan mikro serta air hidrasi (kristal) yang terikat di dalam struktur kristal trisodium sitrat dihidrat. Air mikro yang terlepas ini bertindak sebagai media pelarut lokal berukuran mikroskopis pada titik-titik kontak kristal.[19] Hal ini menginisiasi disosiasi ion natrium (Na^+) dari sitrat dan de-strukturisasi parsial dari kisi kristal planar urea yang kaku, menciptakan fasa pra-nukleasi yang sangat reaktif di mana molekul-molekul urea mulai terkoordinasi secara acak di sekitar anion sitrat.[22]

Tahap 2: Pemanasan Gradual hingga 90 °C

Campuran precursor padat tersebut kemudian dipanaskan secara bertahap (gradual) menggunakan hot plate hingga mencapai suhu target $90\ ^\circ\text{C}$.[19] Laju kenaikan suhu yang lambat dan terukur ini sangat krusial; jika pemanasan dilakukan secara instan (shock heating), molekul urea akan mengalami dekomposisi termal yang cepat menjadi gas amonia dan asam sianat, serta memicu aglomerasi kristal akibat laju nukleasi yang terlalu acak.[2]

Selama proses pemanasan gradual ini, fenomena **depresi titik eutektik** (eutectic point depression) terjadi dalam sistem campuran.[21] Meskipun titik leleh urea murni berada pada $133\ ^\circ\text{C}$ dan trisodium sitrat murni jauh di atas $300\ ^\circ\text{C}$, interaksi asosiatif kuat antara molekul donor urea dan akseptor sitrat secara dramatis menurunkan energi kisi sistem campuran.[21] Campuran urea-sitrat membentuk fasa lelehan eutektik (melt phase) pada kisaran suhu $90 - 95\ ^\circ\text{C}$.[21] Transisi fasa dari padat ke cair tanpa bantuan pelarut eksternal ini meningkatkan mobilitas translasi dan rotasi molekul secara drastis, memfasilitasi terjadinya orientasi ulang molekul urea dan sitrat untuk memaksimalkan pembentukan ikatan hidrogen

antarmolekul yang sangat rapat.[20]

Tahap 3: Reaksi Isotermal pada Suhu 90 °C selama 1 Jam

Setelah sistem mencapai suhu konstan $90\ ^{\circ}\mathrm{C}$, kondisi isotermal dipertahankan selama satu jam penuh untuk menyempurnakan proses perakitan mandiri (self-assembly) skala nano.[19]

Di bawah pengaruh energi termal konstan ini, molekul urea cenderung saling berasosiasi membentuk kluster-kluster molekuler awal (self-associates) yang merupakan prekursor pembentukan inti kristal.[22] Berdasarkan **Teori Nukleasi Dua Tahap** (Two-Step Nucleation Theory), pembentukan kristal diawali dengan terbentuknya kluster cair padat yang tidak teratur, yang kemudian mengalami reorientasi struktural menjadi kisi kristal tiga dimensi yang teratur.[22] Di sinilah trisodium sitrat menjalankan fungsi utamanya sebagai inhibitor nukleasi kristal yang sangat efisien.[22]

Anion sitrat yang bermuatan negatif mengelilingi kluster urea dengan cepat melalui pembentukan jembatan hidrogen multipel $N-H\cdots O-C$.[20] Penumpukan muatan negatif sitrat di sekeliling kluster urea menciptakan gaya tolak-menolak elektrostatik yang kuat antar-kluster, mencegah penggabungan kluster-kluster kecil tersebut menjadi agregat yang lebih besar (mencegah koalesensi).[22] Selain itu, adsorpsi sitrat pada permukaan kluster urea secara fisik memblokir situs aktif pertumbuhan kristal (step-pinning), membatasi pergerakan molekul urea bebas, dan menunda reorientasi teratur kluster urea menjadi inti kristal makroskopis.[22] Akibatnya, pertumbuhan kristal terhenti secara permanen pada skala metastabil nanometer, menghasilkan partikel nano urea yang terdispersi secara homogen.[9]

Tahap 4: Transisi Optik Akhir Menjadi Warna Abu-abu (Ash Color)

Setelah pemanasan selama 1 jam selesai, sistem mengalami transisi warna yang sangat jelas dari jernih/putih menjadi warna abu-abu keruh (ash color), yang menandakan keberhasilan pembentukan nano urea.[6] Perubahan optis yang dramatis ini dijelaskan oleh dua mekanisme fisikokimia yang saling bersinergi:

1. **Hamburan Cahaya Elastis (Efek Tyndall):** Partikel nano urea yang terbentuk memiliki diameter berkisar antara 20 hingga 50 nm.[4] Ketika partikel koloid berada pada rentang ukuran ini (di bawah panjang gelombang cahaya tampak), mereka akan menghamburkan cahaya datang secara elastis.[7] Hamburan cahaya yang intens oleh jutaan nanopartikel yang terdispersi secara stabil ini memberikan penampilan fisik yang keruh keputihan atau abu-abu mutiara pada larutan.[6]
2. **Kondensasi Termal Parsial dan Pembentukan Oligomer:** Pada suhu $90\ ^{\circ}\mathrm{C}$ selama 1 jam, sebagian kecil molekul urea mengalami reaksi kondensasi termal ringan (deaminasi parsial) membentuk oligomer urea rantai pendek seperti biuret ($NH_2-CO-NH-CO-NH_2$) atau triuret, yang kemudian berinteraksi erat

dengan produk dehidrasi parsial sitrat membentuk kompleks koordinasi semi-kondensasi.[20] Spesiasi oligomerik rantai pendek ini memiliki tingkat delokalisasi elektron π yang sempit yang menyerap sebagian kecil spektrum cahaya tampak di daerah ultraviolet-dekat hingga biru.[21] Kombinasi antara hamburan fisik partikel nano (Tyndall) dengan penyerapan spektral ringan dari spesies oligomerik ini menghasilkan visualisasi abu-abu (ash) yang stabil dan khas.[6]

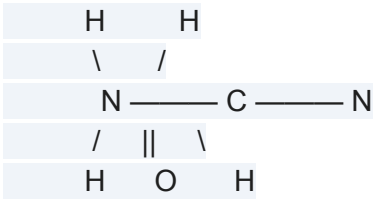
Ilustrasi Mekanisme Molekuler Tiap Tahapan Sintesis

Berikut adalah ilustrasi skematis struktur molekul dari urea dan trisodium sitrat serta interaksi kimia yang terjadi pada setiap tahapan pembuatan nano urea:

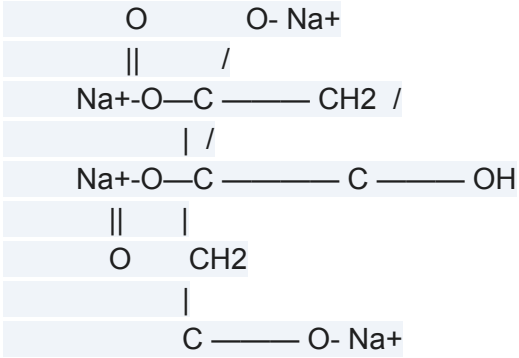
Tahap 1: Struktur Molekul Individu Precursor (Suhu Kamar)

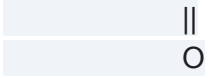
Urea dan trisodium sitrat berada dalam fasa kristalin terpisah, masing-masing dengan kisi kristal yang teratur dan belum bercampur secara kimiawi.[19]

Molekul Urea (Struktur Planar):



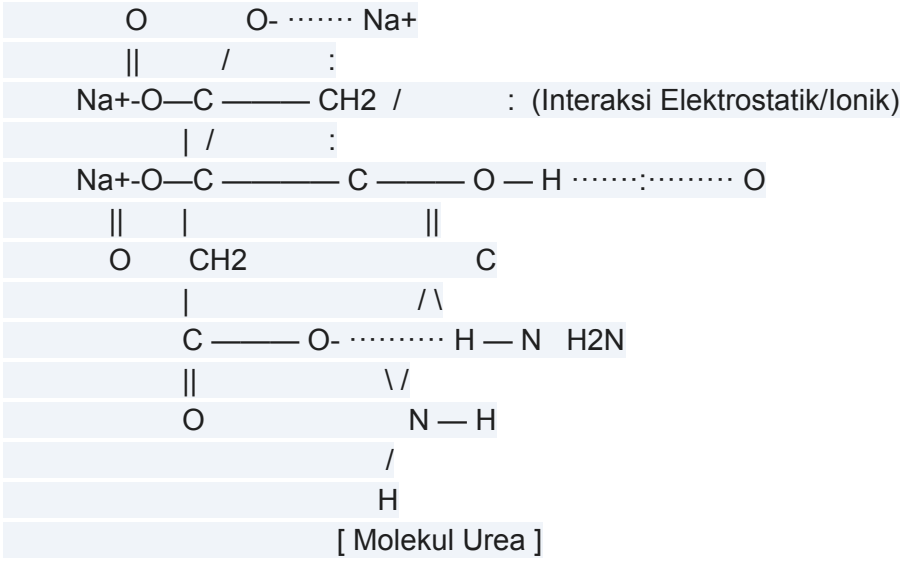
Molekul Trisodium Sitrat Anhidrat:





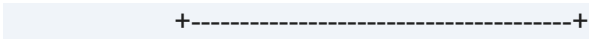
Tahap 2: Pembentukan Jaringan Ikatan Hidrogen dan Koordinasi Eutektik (Gradual Heating)

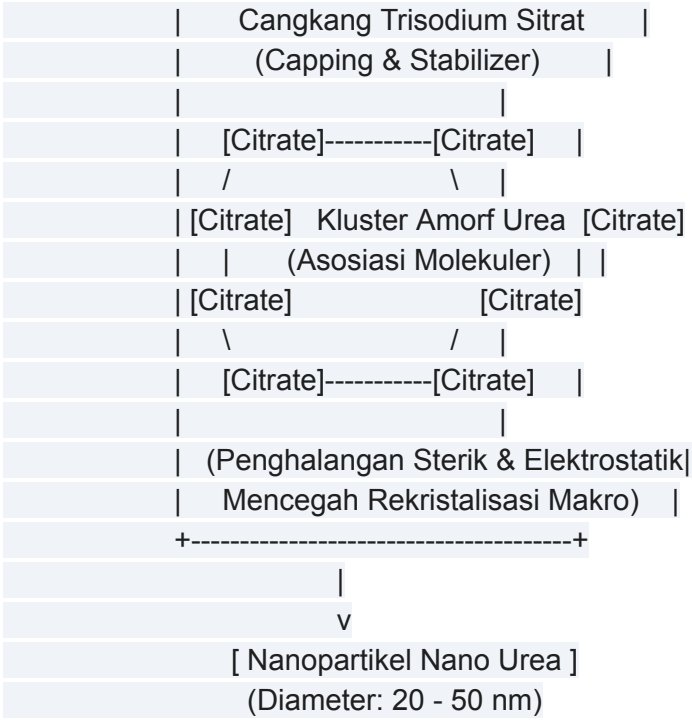
Selama pemanasan bertahap menuju $90\ ^{\circ}\mathrm{C}$, pelunakan kisi kristal memungkinkan pelepasan air hidrasi sitrat yang menginduksi koordinasi ion natrium (Na^{+}) dengan gugus karbonil urea, serta memicu pembentukan jaringan ikatan hidrogen multipel ($N-H\cdots O$).[20]



Tahap 3: Perakitan Mandiri Kluster Skala Nano dan Inhibisi Nukleasi (Penahanan 90 °C selama 1 Jam)

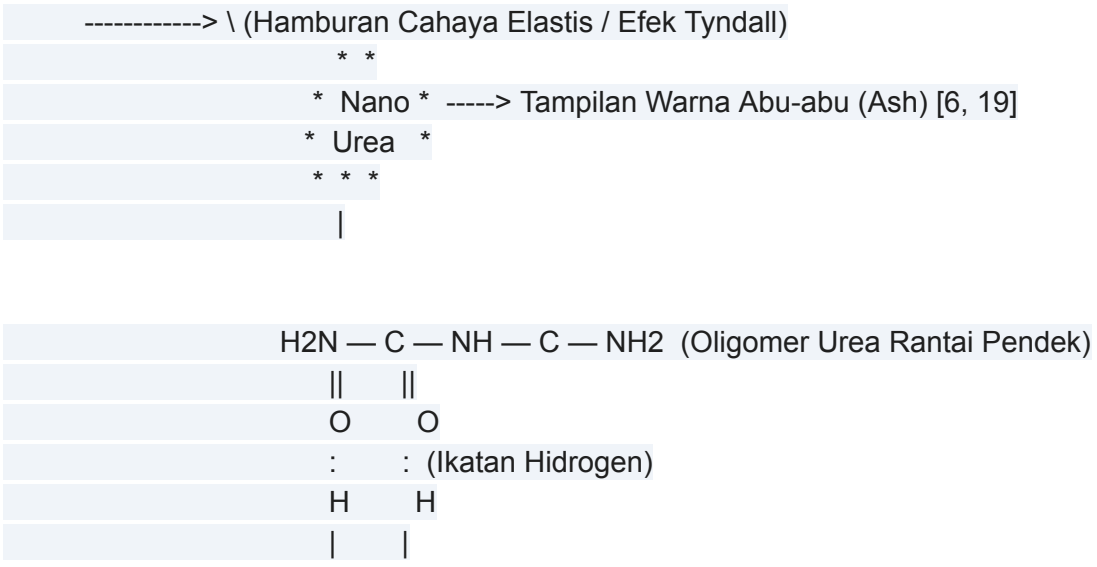
Struktur molekul pada tahap ini dicirikan oleh pembentukan kluster amorf urea (inti nano urea) yang dibatasi perkembangannya oleh penudungan (capping) selektif dari anion sitrat di sekeliling permukaannya.[22]

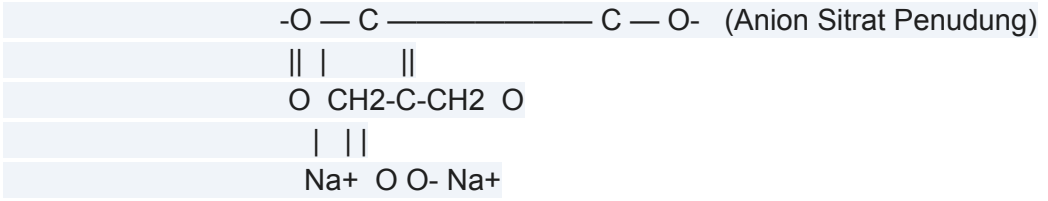




Tahap 4: Fasa Koloid Akhir dan Dispersi Stabil Berwarna Abu-abu (Ash)

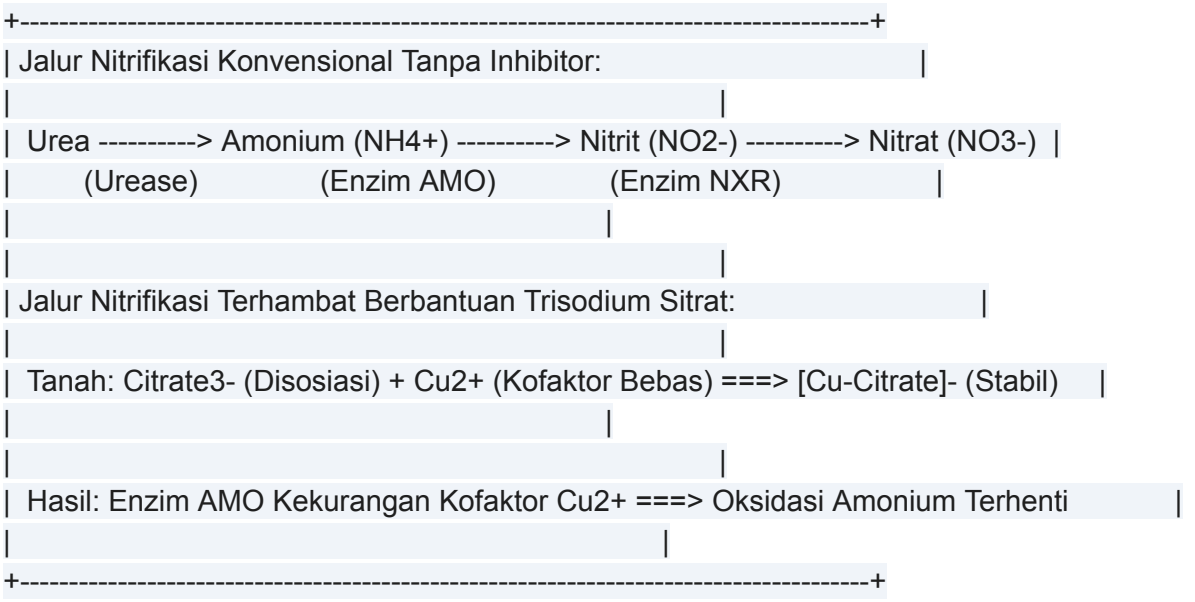
Nanopartikel urea-sitrat yang stabil secara koloidal mengalami deaminasi termal sangat ringan menghasilkan spesies oligomerik terkoordinasi yang siap menyebarkan cahaya tampak.[6]





Mekanisme Trisodium Sitrat sebagai Penghambat Nitrifikasi Fisiologis

Kehadiran trisodium sitrat di dalam struktur nano urea tidak hanya berperan sebagai agen pengendali ukuran fisik selama sintesis, melainkan juga mengemban peran fungsional yang sangat penting sebagai penghambat nitrifikasi (nitrification inhibitor) biologis saat diaplikasikan ke tanah.[19]



Oksidasi amonium (NH_4^+) menjadi nitrit (NO_2^-) oleh bakteri pengoksidasi amonia (Ammonia-Oxidizing Bacteria/AOB seperti *Nitrosomonas*) dikatalisis oleh enzim kunci bernama **Amonia Monooksigenase (AMO)**.[2] Secara struktural, AMO adalah metalloenzim transmembran yang membutuhkan ion tembaga (Cu^{2+}) bebas pada situs aktifnya sebagai

kofaktor transfer elektron yang mutlak diperlukan untuk aktivitas katalitiknya.[3]

Ketika nano urea berbantuan trisodium sitrat dilepaskan ke dalam tanah, trisodium sitrat terdisosiasi melepaskan anion sitrat ($C_6H_5O_7^{3-}$) yang bertindak sebagai ligan pengkelat polidentat yang sangat kuat.[24] Anion sitrat memiliki afinitas pengikatan yang sangat tinggi terhadap ion tembaga (Cu^{2+}) bebas di dalam pori tanah, membentuk kompleks koordinasi $[Cu(C_6H_5O_7)]^-$ yang sangat stabil dengan konstanta stabilitas yang tinggi.[24]

Melalui pengkelatan selektif ini, sitrat secara efektif menurunkan bioavabilitas ion Cu^{2+} bebas yang dibutuhkan oleh bakteri AOB.[3] Akibat kekurangan kofaktor tembaga, sintesis dan aktivitas fungsional dari enzim AMO mengalami kegagalan, yang secara dramatis menghambat laju konversi amonium (NH_4^+) menjadi nitrit (NO_2^-).[3] Karena amonium yang bermuatan positif (NH_4^+) dapat diikat dengan sangat kuat oleh situs pertukaran kation pada koloid lempung dan bahan organik tanah, nitrogen dipertahankan dalam zona perakaran tanaman jauh lebih lama.[2] Hal ini mencegah pembentukan anion nitrat (NO_3^-) yang bermuatan negatif, yang tidak dapat diikat oleh tanah sehingga sangat rentan terhadap pencucian (leaching) akibat aliran air.[2]

Karakteristik Fisikokimia dan Perilaku Rilis Lambat Nano Urea

Sifat-sifat unggul nano urea yang disintesis melalui metode termal ini memberikan dampak signifikan terhadap kinetika rilis nitrogen dan efisiensi penyerapan oleh tanaman.[7]

Tabel 4: Karakteristik Fisikokimia Unggul dari Nano Urea Berbantuan Sitrat

Sifat Fisikokimia	Nilai Khas	Signifikansi Fungsional
Diameter Hidrodinamis	20 - 50 nm [9, 10]	Penyerapan stomata foliar instan tanpa hambatan
Potensial Zeta	> +30 mV atau < -30 mV [4]	Stabilitas koloid yang tinggi, mencegah aglomerasi sekunder saat disimpan [4, 26]
Kandungan Nitrogen total	Rata-rata 4% - 8%	Dosis aplikasi rendah namun efisiensi tinggi

	[9, 10]	[1, 17]
Profil Pelepasan N (Air)	Pelepasan bertahap	Meminimalkan lonjakan kadar amonia toksik
	> 28 hari [14, 15]	lokal pada jaringan tanaman [4, 33]

Kombinasi struktur molekul nano urea yang terenkapsulasi secara parsial dalam matriks pelindung seperti hidrogel karboksimetil selulosa (CMC) atau kitosan menghasilkan sistem pupuk lepas lambat (slow-release fertilizer) yang luar biasa.[6] Di dalam tanah, air tanah secara perlahan berdifusi masuk ke dalam matriks pelindung nano urea.[35] Proses hidrasi ini menyebabkan matriks mengembang (swelling) secara perlahan, menciptakan jaringan berpori mikroskopis.[35]

Molekul urea berskala nano yang terikat secara non-kovalen pada penudung sitrat kemudian berdifusi keluar melewati saluran pori matriks yang berkelok-kelok (tortuous path) secara sangat lambat dan konstan.[13] Profil pelepasan nitrogen yang lambat dan tersinkronisasi ini (memakan waktu lebih dari 30 hari dibandingkan urea biasa yang langsung habis dalam 3 hari) memastikan ketersediaan nitrogen yang berkelanjutan bagi tanaman sepanjang fase pertumbuhan aktifnya, sekaligus memangkas drastis emisi gas rumah kaca dinitrogen oksida (N_2O) serta pencucian nitrat ke badan air.[1]

Kesimpulan

Sintesis nano urea melalui pencampuran $0.30\ \text{g}$ urea molekuler dan $0.86\ \text{g}$ trisodium sitrat yang dipanaskan secara gradual hingga suhu $90\ ^\circ\text{C}$ selama satu jam merupakan sebuah pendekatan rekayasa kimia hijau (*green chemistry*) yang sangat efisien dan berdaya guna tinggi.[19] Sintesis ini memanfaatkan fenomena penurunan titik eutektik campuran padat untuk membentuk fasa lelehan transisi yang reaktif pada suhu termal ringan.[21]

Selama reaksi isotermal berlangsung, trisodium sitrat berperan ganda yang sangat krusial: secara fisik bertindak sebagai agen penudung (*capping agent*) yang menghambat nukleasi dan pertumbuhan kristal makroskopis urea melalui mekanisme *step-pinning* sehingga menghasilkan nanopartikel metastabil berukuran 20–50 nm [9], dan secara biologis bertindak sebagai penghambat nitrifikasi aktif di tanah dengan mengkelat kofaktor logam tembaga (Cu^{2+}) pada enzim amonia monooksigenase.[3] Keberhasilan pembentukan nano urea terkonfirmasi secara makroskopis melalui transisi warna larutan menjadi abu-abu (*ash color*), yang ditimbulkan oleh kombinasi hamburan cahaya elastis efek Tyndall dari nanopartikel stabil serta serapan optis ringan dari spesies oligomerik terkoordinasi hasil kondensasi termal ringan.[6] Teknologi hibrida nano urea-sitrat ini menawarkan masa depan pertanian yang ramah lingkungan, mampu memangkas kebutuhan pupuk nitrogen hingga setengahnya, sekaligus meningkatkan hasil

panen dan melestarikan kualitas ekosistem tanah dan air secara berkelanjutan.[1]

Works cited

1. Conjoint application of nano-urea with conventional fertilizers: An energy efficient and environmentally robust approach for sustainable crop production - PMC, accessed on May 17, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10321634/
2. Synergistic Effect of Urease and Nitrification Inhibitors in the Reduction of Ammonia Volatilization - ChemRxiv, accessed on May 17, 2026, https://chemrxiv.org/doi/pdf/10.26434/chemrxiv.13966805.v1
3. Effect of the Nitrification Inhibitor DMPP on Blueberry Planted in Neutral Soil - MDPI, accessed on May 17, 2026, https://www.mdpi.com/2073-4395/14/9/2029
4. Assessing the scope for nano-urea to reduce nitrogen inputs while maintaining rice yields in India - Frontiers, accessed on May 17, 2026, https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2026.1759447/full
5. WO2018193344A1 - Enhanced efficiency fertilizer with urease inhibitor and nitrification inhibitor separated within the same particle - Google Patents, accessed on May 17, 2026, https://patents.google.com/patent/WO2018193344A1/en
6. Synthesis and characterization of a novel slow-release nanourea/chitosan nanocomposite and its effect on Vigna radiata L. - RSC Publishing, accessed on May 17, 2026, https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/en/d2en00297c
7. Synthesis and Characterization of Nano-urea and its Effects on Growth and Yield of Wheat in - AWS, accessed on May 17, 2026, https://sdiopr.s3.ap-south-1.amazonaws.com/2024/Jan/2-Jan-24/2023_IJECC_111413/Ms_IJECC_111413.pdf
8. Nano urea and its Superiority Over urea as Fertilizer Elaborating some Applications - An Overview - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/383402189_Nano_urea_and_its_Superiority_Over_urea_as_Fertilizer_Elaborating_some_Applications_-_An_Overview
9. NANO UREA - Zuari FarmHUB, accessed on May 17, 2026, https://zuarifarmhub.com/nano-fertilisers-nano-urea
10. Nano Urea (Liquid) Fertilizer - IFFCO India, accessed on May 17, 2026, https://www.iffco.in/en/nano-urea-liquid-fertilizer
11. Synergistic Effect of Conventional and Nano Urea on Growth, Yield, and Economics of Barley (Hordeum vulgar, accessed on May 17, 2026, https://journalijpss.com/index.php/IJPSS/article/download/5972/12906/8758
12. A review-chitosan nanoparticles towards enhancing nutrient use efficiency in crops, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/389291820_A_review-chitosan_nanoparticles_towards_enhancing_nutrient_use_efficiency_in_crops
13. Preparation and Properties of a Double-Coated Slow-Release and Water-Retention Urea Fertilizer | Journal of Agricultural and Food Chemistry - ACS Publications, accessed on May 17, 2026,

https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf052582f
14. Water Absorption Capacity and Agricultural Utility of Biopolymer-Based Hydrogels: A Systematic Review and Meta-Analysis - PMC, accessed on May 17, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12355620/
15. Complete Application Guide for Nano Urea, accessed on May 17, 2026, https://nanourea.in/en/application
16. Nano Urea: Application and Significance - Just Agriculture, accessed on May 17, 2026, https://justagriculture.in/files/newsletter/2022/march/021.pdf
17. Formulation of a Hybrid Nanofertilizer for Slow and Sustainable Release of Micronutrients | ACS Omega - ACS Publications, accessed on May 17, 2026, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c03233
18. Carbon nanodots revised: the thermal citric acid/urea reaction - RSC Publishing, accessed on May 17, 2026, https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/sc/d0sc01605e
19. Carbon nanodots revised: the thermal citric acid/urea reaction - PMC, accessed on May 17, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8163031/
20. Inhibition of Crystal Nucleation and Growth: A Review - ACS Publications, accessed on May 17, 2026, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.cgd.3c01345
21. 2 - Crystals, crystal growth, and nucleation - R Discovery, accessed on May 17, 2026, https://discovery.researcher.life/article/2-crystals-crystal-growth-and-nucleation/337aa9e1ecfc35a2b82eaf8a0c238d43
22. (PDF) Reaction of Urea with Citric Acid - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/244501512_Reaction_of_Urea_with_Citric_Acid
23. NMR-Based Mechanistic Study of Crystal Nucleation Inhibition in a Supersaturated Drug Solution by Polyvinylpyrrolidone - ACS Publications, accessed on May 17, 2026, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.cgd.2c00084
24. Development and Assessment of Plant-Based Nano- Fertilizer for Sustainable Agriculture - IJRASET, accessed on May 17, 2026, https://www.ijraset.com/best-journal/development-and-assessment-of-plantbased-nanofertilizer-for-sustainable-agriculture
25. Struvite crystal growth inhibition by trisodium citrate and the formation of chemical complexes in growth solution | Request PDF - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/273119187_Struvite_crystal_growth_inhibition_by_trisodium_citrate_and_the_formation_of_chemical_complexes_in_growth_solution
26. Evaluating the impact of an organic nitrification inhibitor on nitrogen availability and its influence on microbial population i, accessed on May 17, 2026, https://horizonepublishing.com/index.php/PST/article/download/6652/6002/45885
27. accessed on May 17, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7513328/#:~:text=First%2C%200.30%20g%20of%20urea,nitrification%20inhibitor%20for%20nanourea%20production.

28. Inhibition of Crystal Nucleation and Growth: A Review | Request PDF - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/379149080_Inhibition_of_Crystal_Nucleation_and_Growth_A_Review
29. A low-temperature solid-phase method to synthesize highly fluorescent carbon nitride dots with tunable emission | Request PDF - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/237094295_A_low-temperature_solid-phase_method_to_synthesize_highly_fluorescent_carbon_nitride_dots_with_tunable_emission
30. Synthesis and characterization of slow release f… — Library of Science - Biblioteka Nauki, accessed on May 17, 2026, https://bibliotekanauki.pl/articles/64183274
31. Synthesis and Characterization of a Novel Slow-release Nanourea /Chitosan nanocomposite and its effect on Vigna radiata L. | Request PDF - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/364313556_Synthesis_and_Characterization_of_a_Novel_Slow-release_Nanourea_Chitosan_nanocomposite_and_its_effect_on_Vigna_radiata_L
32. Environmentally Friendly Carboxymethyl Cellulose Hydrogels Derived from Waste Paper and Sawdust as a Urea Release Agent - PMC, accessed on May 17, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12059939/
33. Mitigating Abiotic Stress and Enhancing Crop Yield Through Micronutrient-Based Nano Fertilizer - Oriental Journal of Chemistry, accessed on May 17, 2026, https://www.orientjchem.org/vol41no5/mitigating-abiotic-stress-and-enhancing-crop-yield-through-micronutrient-based-nano-fertilizer/
34. Preparation of Cellulose Hydrogels and Hydrogel Nanocomposites Reinforced by Crystalline Cellulose Nanofibers (CNFs) as a Water Reservoir for Agriculture Use | ACS Applied Polymer Materials - ACS Publications, accessed on May 17, 2026, https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsapm.3c00109
35. Preparation and Properties of a Double-Coated Slow-Release and Water-Retention Urea Fertilizer | Request PDF - ResearchGate, accessed on May 17, 2026, https://www.researchgate.net/publication/7299301_Preparation_and_Properties_of_a_Double-Coated_Slow-Release_and_Water-Retention_Urea_Fertilizer