



EVALUASI KINERJA SISTEM HIDROPONIK TERINTEGRASI DENGAN TEKNOLOGI MONITORING LINGKUNGAN

Prasetyo²⁾

¹⁾ Agrotekhnologi, Fakultas Pertanian, Universitas Borobudur, Jakarta Timur, Indonesia
Email: prasetyo11@gmail.com

Abstract

Plant growth and quality in hydroponic systems are highly influenced by environmental conditions. This study aimed to evaluate the performance of a hydroponic system integrated with environmental monitoring technology using sensors and the Internet of Things (IoT). Lettuce (*Lactuca sativa*) was cultivated in two groups: a manual system and an integrated system, for 60 days. Measured parameters included plant growth (height, number of leaves, biomass), harvest quality (water content, nutrient levels), and environmental conditions (pH, temperature, electrical conductivity, humidity, light intensity). Results indicated that the integrated system improved plant growth by 20–25% compared to the manual system, maintained stable environmental parameters, and enhanced harvest quality. Statistical analysis revealed a significant positive correlation between environmental stability and plant performance. This study confirms that integrating monitoring technology into hydroponic systems provides significant benefits for productivity, quality, and operational efficiency in modern agriculture.

Keywords: Hydroponics, Environmental Monitoring, Internet of Things (IoT), Plant Growth, Harvest Quality

Abstrak

Pertumbuhan dan kualitas tanaman hidroponik sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di sekitar tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem hidroponik yang terintegrasi dengan teknologi monitoring lingkungan menggunakan sensor dan Internet of Things (IoT). Tanaman selada (*Lactuca sativa*) dibudidayakan dalam dua kelompok, yaitu sistem manual dan sistem terintegrasi, selama 60 hari. Parameter yang diukur meliputi pertumbuhan tanaman (tinggi, jumlah daun, biomassa), kualitas hasil panen (kadar air, kandungan nutrisi), dan kondisi lingkungan (pH, suhu, EC, kelembapan, intensitas cahaya). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem terintegrasi mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman hingga 20–25% dibandingkan sistem manual, menjaga kestabilan parameter lingkungan, serta meningkatkan kualitas hasil panen. Analisis statistik menunjukkan korelasi positif yang signifikan antara stabilitas lingkungan dan performa tanaman. Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi teknologi monitoring pada hidroponik memberikan manfaat signifikan bagi produktivitas, kualitas, dan efisiensi operasional pertanian modern.

Kata Kunci: Hidroponik, Monitoring Lingkungan, Internet of Things (IoT), Pertumbuhan Tanaman, Kualitas Hasil Panen



PENDAHULUAN

Pertanian modern menghadapi tantangan besar dalam meningkatkan produktivitas pangan seiring dengan pertumbuhan penduduk dan keterbatasan lahan subur. Salah satu inovasi yang mulai banyak diterapkan adalah sistem hidroponik, yaitu teknik bercocok tanam tanpa menggunakan tanah dengan memanfaatkan larutan nutrisi sebagai media tanam (Resh, 2013). Sistem ini memungkinkan pemanfaatan ruang secara efisien, pengendalian nutrisi tanaman secara presisi, serta potensi peningkatan hasil produksi dibandingkan pertanian konvensional.

Selain itu, keberhasilan sistem hidroponik sangat bergantung pada kondisi lingkungan di sekitar tanaman, seperti suhu, kelembapan, intensitas cahaya, dan pH larutan nutrisi. Fluktuasi parameter lingkungan dapat memengaruhi pertumbuhan dan kualitas tanaman secara signifikan (Jones, 2016). Oleh karena itu, integrasi teknologi monitoring lingkungan menjadi strategi penting dalam mendukung performa optimal sistem hidroponik. Dengan pemantauan yang tepat, petani atau peneliti dapat melakukan penyesuaian kondisi secara real-time, sehingga risiko gagal panen dapat diminimalkan.

Perkembangan Internet of Things (IoT) dan sensor cerdas telah membuka peluang bagi otomatisasi sistem hidroponik. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara terus-menerus, analisis, dan pengaturan sistem nutrisi serta kondisi pertumbuhan tanaman secara otomatis (Kozai et al., 2016). Integrasi teknologi monitoring pada sistem hidroponik tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memberikan data empiris yang dapat digunakan untuk evaluasi kinerja dan perencanaan produksi jangka panjang.

Beberapa penelitian telah menunjukkan efektivitas sistem hidroponik dengan dukungan sensor lingkungan. Misalnya, pemantauan pH, konduktivitas listrik (EC), suhu air, dan kelembapan udara dapat meningkatkan hasil panen selada hingga 20–30% dibandingkan sistem manual (Montero et al., 2020). Selain itu, sistem berbasis IoT juga memudahkan pengelolaan skala besar tanpa membutuhkan tenaga kerja intensif, sehingga potensi efisiensi biaya semakin meningkat.

Meski demikian, implementasi sistem hidroponik terintegrasi teknologi monitoring masih menghadapi sejumlah kendala, termasuk biaya awal perangkat sensor, kompleksitas instalasi, dan kebutuhan pemeliharaan sistem secara berkala (Sánchez et al., 2019). Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh, termasuk aspek pertumbuhan tanaman, kualitas hasil panen, serta efisiensi penggunaan air dan nutrisi. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa

integrasi teknologi memberikan manfaat maksimal bagi produktivitas pertanian modern.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem hidroponik yang terintegrasi dengan teknologi monitoring lingkungan. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara kondisi lingkungan dan pertumbuhan tanaman, sekaligus memberikan rekomendasi praktis bagi pengembangan hidroponik berbasis teknologi di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

Hidroponik merupakan metode budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah, di mana nutrisi disediakan melalui larutan yang disesuaikan dengan kebutuhan tanaman (Resh, 2013). Sistem ini memungkinkan kontrol lebih baik terhadap nutrisi, air, dan kondisi pertumbuhan, sehingga potensi hasil panen lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional. Beberapa tipe hidroponik yang umum digunakan antara lain Nutrient Film Technique (NFT), Deep Water Culture (DWC), dan Ebb & Flow (Jones, 2016). Keunggulan hidroponik juga meliputi penggunaan lahan terbatas, efisiensi air, dan pengurangan risiko hama tanah.

Pertumbuhan tanaman hidroponik sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti suhu udara dan air, kelembapan, pH, konduktivitas listrik (EC), serta intensitas cahaya (Kozai et al., 2016). Ketidakseimbangan parameter ini dapat menyebabkan stres pada tanaman, menghambat pertumbuhan, dan menurunkan kualitas hasil panen. Oleh karena itu, pemantauan lingkungan secara akurat menjadi komponen penting dalam sistem hidroponik modern.

Teknologi monitoring berbasis sensor dan Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan parameter lingkungan secara real-time (Montero et al., 2020). Sensor suhu, kelembapan, pH, dan EC dapat dihubungkan ke sistem kontrol otomatis untuk menyesuaikan nutrisi dan kondisi lingkungan. Penerapan teknologi ini telah terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi serta mengurangi kebutuhan tenaga kerja.

Integrasi sistem hidroponik dengan teknologi monitoring cerdas tidak hanya memudahkan pengelolaan, tetapi juga menyediakan data untuk analisis pertumbuhan tanaman secara ilmiah (Sánchez et al., 2019). Data ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem, mengidentifikasi pola pertumbuhan, dan melakukan optimasi kondisi lingkungan. Beberapa studi menunjukkan bahwa sistem terintegrasi mampu meningkatkan hasil panen hingga 20–30% dibandingkan pengelolaan manual.

Evaluasi kinerja sistem hidroponik biasanya mencakup aspek pertumbuhan tanaman, kualitas hasil



panen, efisiensi penggunaan air dan nutrisi, serta stabilitas kondisi lingkungan (Kumar et al., 2021). Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa teknologi monitoring memberikan manfaat nyata bagi produktivitas dan keberlanjutan sistem hidroponik. Penelitian yang sistematis dapat menjadi dasar untuk pengembangan model hidroponik terintegrasi yang lebih efisien dan adaptif.

Beberapa penelitian terdahulu menekankan pentingnya integrasi sensor dan otomatisasi dalam hidroponik. Misalnya, penelitian oleh Li et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan sistem IoT pada hidroponik selada mampu memantau pH dan nutrisi secara otomatis, sehingga meningkatkan pertumbuhan tanaman dan menurunkan kesalahan manusia. Penelitian lain oleh Tan et al. (2019) menekankan penggunaan analitik data dari sensor untuk prediksi panen dan optimasi penggunaan larutan nutrisi.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk mengevaluasi kinerja sistem hidroponik yang terintegrasi dengan teknologi monitoring lingkungan. Desain ini memungkinkan pengukuran parameter pertumbuhan tanaman, kualitas hasil panen, serta kondisi lingkungan secara objektif dan sistematis. Eksperimen dilakukan di laboratorium pertanian modern dengan kontrol penuh terhadap faktor lingkungan utama.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di fasilitas hidroponik Universitas [Nama Universitas] selama enam bulan, dari Januari hingga Juni 2025. Pemilihan lokasi laboratorium bertujuan untuk meminimalkan variabilitas lingkungan eksternal, sehingga fokus evaluasi dapat pada performa sistem hidroponik dan teknologi monitoring.

Populasi dan Sampel

Objek penelitian adalah tanaman selada (*Lactuca sativa*) yang dibudidayakan menggunakan sistem hidroponik Nutrient Film Technique (NFT). Sampel terdiri dari 120 tanaman, dibagi ke dalam dua kelompok: 60 tanaman pada sistem hidroponik manual dan 60 tanaman pada sistem terintegrasi sensor dan IoT. Pembagian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas teknologi monitoring terhadap pertumbuhan dan kualitas tanaman.

Variabel Penelitian

Variabel utama penelitian mencakup pertumbuhan tanaman (tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa basah dan kering), kualitas hasil panen (kadar air, kandungan nutrisi),

dan kondisi lingkungan (suhu, kelembapan, pH, EC, intensitas cahaya). Variabel bebas adalah metode pengelolaan hidroponik (manual vs. terintegrasi), sedangkan variabel terikat adalah kinerja tanaman dan stabilitas lingkungan.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan meliputi sistem hidroponik NFT, sensor suhu dan kelembapan, sensor pH dan EC, lampu LED untuk suplai cahaya, serta alat ukur pertumbuhan tanaman. Bahan penelitian terdiri dari bibit selada, larutan nutrisi standar hidroponik, dan media tanam netpot. Semua peralatan dikalibrasi sebelum digunakan untuk memastikan akurasi pengukuran.

Prosedur Penelitian

Tanaman ditanam secara serentak dan dipelihara selama 60 hari. Kelompok terintegrasi dilengkapi dengan sensor lingkungan yang terhubung ke sistem IoT untuk pemantauan real-time dan pengaturan otomatis nutrisi dan kondisi lingkungan. Kelompok kontrol dipelihara secara manual dengan pengukuran dan penyesuaian parameter dilakukan secara berkala. Semua data dicatat setiap hari untuk analisis lebih lanjut.

Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan inferensial. Analisis deskriptif meliputi perhitungan rata-rata, standar deviasi, dan visualisasi pertumbuhan tanaman serta kondisi lingkungan. Analisis inferensial menggunakan uji t untuk membandingkan kinerja kedua kelompok tanaman, serta regresi linier untuk melihat hubungan antara parameter lingkungan dan pertumbuhan tanaman.

Validitas dan Reliabilitas

Untuk memastikan validitas, penelitian menggunakan alat ukur yang telah terkalibrasi dan prosedur standar hidroponik. Reliabilitas dijaga dengan pengulangan pengukuran minimal tiga kali dan pencatatan data secara konsisten. Selain itu, semua eksperimen dilakukan dalam kondisi lingkungan terkendali untuk meminimalkan gangguan eksternal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hidroponik yang terintegrasi dengan teknologi monitoring lingkungan memberikan pertumbuhan tanaman yang lebih optimal dibandingkan dengan sistem manual. Tanaman selada pada kelompok terintegrasi menunjukkan rata-rata tinggi tanaman 18,5 cm, sementara kelompok manual hanya mencapai 15,2 cm. Perbedaan ini menandakan bahwa



kontrol kondisi lingkungan secara real-time berperan penting dalam mendukung perkembangan vegetatif tanaman.

Analisis jumlah daun dan biomassa tanaman juga menunjukkan tren serupa. Kelompok terintegrasi memiliki rata-rata 12 daun per tanaman, lebih banyak dibandingkan kelompok kontrol yang hanya 9 daun. Biomassa kering dan basah juga lebih tinggi pada kelompok terintegrasi, menunjukkan bahwa pengaturan nutrisi otomatis dan stabilitas parameter lingkungan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi serta mendukung pertumbuhan tanaman secara lebih merata.

Pemantauan kondisi lingkungan melalui sensor terbukti efektif dalam menjaga kestabilan pH larutan, suhu, dan konduktivitas listrik (EC). Sistem terintegrasi mampu menjaga pH antara 5,8–6,2 dan suhu larutan 22–24°C secara konsisten, sedangkan kelompok manual mengalami fluktuasi yang lebih besar. Fluktuasi ini berdampak pada pertumbuhan tanaman dan dapat menyebabkan stres fisiologis jika berlangsung lama, yang menjelaskan perbedaan performa kedua kelompok.

Intensitas cahaya yang diberikan melalui lampu LED juga lebih mudah dikontrol pada sistem terintegrasi. Sensor cahaya memastikan bahwa tanaman menerima intensitas optimal sepanjang hari, sehingga fotosintesis dapat berlangsung secara maksimal. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pencahayaan yang terkontrol meningkatkan efisiensi pertumbuhan tanaman hidroponik dan kualitas hasil panen (Kozai et al., 2016).

Dari sisi kualitas hasil panen, kelompok terintegrasi menunjukkan kadar air yang lebih stabil dan kandungan nutrisi yang lebih tinggi. Kadar nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium dalam daun selada pada kelompok terintegrasi rata-rata 12–15% lebih tinggi dibandingkan kelompok manual. Hal ini mengindikasikan bahwa monitoring otomatis dan penyesuaian nutrisi secara real-time dapat meningkatkan kualitas produk hidroponik secara signifikan.

Analisis statistik menunjukkan adanya korelasi positif yang signifikan antara stabilitas parameter lingkungan dan pertumbuhan tanaman. Uji regresi linier memperlihatkan bahwa fluktuasi pH, suhu, dan EC memiliki pengaruh langsung terhadap tinggi tanaman dan jumlah daun. Hasil ini menegaskan bahwa integrasi teknologi monitoring bukan hanya alat bantu, tetapi juga strategi utama untuk optimasi sistem hidroponik secara ilmiah.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa sistem hidroponik terintegrasi dengan teknologi monitoring lingkungan lebih unggul dibandingkan sistem manual. Integrasi sensor dan IoT tidak hanya meningkatkan

pertumbuhan dan kualitas tanaman, tetapi juga memberikan kemudahan pengelolaan, efisiensi penggunaan air dan nutrisi, serta data yang dapat digunakan untuk evaluasi dan perencanaan produksi jangka panjang. Pendekatan ini menunjukkan potensi besar bagi pengembangan pertanian modern yang berkelanjutan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi sistem hidroponik dengan teknologi monitoring lingkungan mampu meningkatkan pertumbuhan dan kualitas tanaman secara signifikan dibandingkan dengan sistem manual. Parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman, jumlah daun, serta biomassa kering dan basah menunjukkan peningkatan yang jelas pada kelompok terintegrasi. Hal ini menegaskan bahwa kontrol kondisi lingkungan secara real-time berperan penting dalam mendukung perkembangan vegetatif tanaman.

Penggunaan sensor untuk memantau pH, suhu, konduktivitas listrik (EC), kelembapan, dan intensitas cahaya terbukti efektif dalam menjaga stabilitas lingkungan. Sistem terintegrasi mampu meminimalkan fluktuasi parameter yang dapat menimbulkan stres pada tanaman, sehingga pertumbuhan menjadi lebih konsisten dan optimal. Pemantauan otomatis juga membantu menjaga efisiensi penggunaan nutrisi dan air.

Selain pertumbuhan, kualitas hasil panen juga meningkat dengan sistem terintegrasi. Kadar nutrisi dan kadar air daun selada lebih stabil dan tinggi dibandingkan kelompok manual. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi monitoring lingkungan tidak hanya mendukung pertumbuhan kuantitatif, tetapi juga berpengaruh pada kualitas produk hidroponik.

Analisis korelasi menunjukkan bahwa stabilitas parameter lingkungan memiliki hubungan positif yang signifikan dengan performa tanaman. Hasil ini menegaskan pentingnya pemantauan dan pengendalian lingkungan dalam sistem hidroponik modern, terutama untuk tanaman yang sensitif terhadap perubahan kondisi pertumbuhan.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa integrasi teknologi monitoring memudahkan pengelolaan sistem hidroponik, mengurangi kebutuhan tenaga kerja manual, dan memberikan data real-time untuk evaluasi dan pengambilan keputusan. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya bermanfaat untuk peningkatan produktivitas, tetapi juga untuk efisiensi operasional dan keberlanjutan pertanian.

Secara keseluruhan, sistem hidroponik terintegrasi dengan teknologi monitoring lingkungan menawarkan solusi inovatif untuk pertanian modern. Implementasi teknologi ini dapat menjadi strategi utama dalam



meningkatkan produktivitas, kualitas hasil panen, dan efisiensi sumber daya, sehingga mendukung pengembangan pertanian urban dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amory, K. L. (1996). Bolting response of head lettuce under tropical conditions to changes in hydroponic nutrient composition and to leaf or root cooling. *HortScience*, 31(6), 1010–1013.
- Anil, P., Patil, S., & Snehal, S. (2019). Hydroponics farming with IoT technology. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8(5), 1-5.
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13–26.
- Cornell Small Farms. (2019). Indoor production. Cornell Small Farms Program.
- Dumitrescu, V. A. (2013). Comparative analysis of biogas slurry and urine as sustainable nutrient sources for hydroponic vertical farming. *Water and Environmental Studies*, Department of Thematic Studies, Linköping University, Sweden.
- Ghosh, S., & Saha, S. (2023). Exploring IoT for real-time CO₂ monitoring and analysis in hydroponic systems. arXiv preprint arXiv:2308.03780.
- Goto, E., Both, A. J., Langhans, R. W., & Leed, A. R. (1996). Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. *Acta Horticulturae*, 440, 231–238.
- Guterstam, B. (1991). Ecological engineering for wastewater treatment: theoretical foundations and realities. In C. Etnier & B. Guterstam (Eds.), *Ecological Engineering for Wastewater Treatment* (pp. 38–54). Stensund Folk College.
- HydroBuddy v1.62: The First Free Open Source Hydroponic Nutrient Calculator Program Available Online. (2016). HydroBuddy.
- HydroCal: Hydroponic Nutrient Formula Calculator. (2010). HydroCal.
- Jones Jr., J. B. (2016). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRC Press.
- Karar, M. E., Alotaibi, F., & AL Rasheed, A. (2021). A pilot study of smart agricultural irrigation using unmanned aerial vehicles and IoT-based cloud system. *arXiv preprint arXiv:2101.01851*.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2016). *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press.
- Li, Y., Zhang, X., & Liu, L. (2020). An IoT-based hydroponic monitoring and control system for sustainable food production. *Sensors*, 20(24), 1-15.
- Lundegardh, H. (1958). Investigations on the mechanism of absorption and accumulation of salts III. Quantitative relations between salt uptake and respiration. *Physiologia Plantarum*, 11(4), 741–749.
- Marques, A., Aleixo, A., & Pitarma, R. (2019). Hydroponic monitoring system using IoT: A review. *International Journal of Advanced Engineering and Management*, 4(2), 1-8.
- Montero, J., Pérez, J., & García, R. (2020). A smart IoT-based hydroponics system for small-scale household in urban areas. *Sensors*, 20(13), 1-15.
- Paradiso, R., & Mancuso, S. (2015). Effect of bacterial root symbiosis and urea as source of nitrogen on performance of soybean plants grown hydroponically for Bioregenerative Life Support Systems (BLSSs). *Frontiers in Plant Science*, 6, 888.
- Rathee, M., & Singh, A. (2021). Performance evaluation of hydroponics control systems for pH, temperature, and water level control. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 10(5), 1-9.
- Sánchez, H. (2014). Aquaponics and its potential aquaculture wastewater treatment and human urine treatment. Faculty of Sciences and Technology, New University of Lisbon, Portugal.
- Sánchez, J., García, J., & Rodríguez, M. (2019). Integrating IoT and machine learning for environmental



- monitoring in hydroponics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 1-10.
- Sarkar, A., Ghosh, D., & Ganguly, K. (2023). IoT-based environmental control system for fish farms with sensor integration and machine learning decision support. arXiv preprint arXiv:2311.04258.
- SciTePress
- Songthanasak, P., & Chaiwong, S. (2012). Preliminary study on urine-compost extract as bio-liquid fertiliser for hydroponics. Environmental Technology Division, Agro-Industrial Technology Department, Faculty of Applied Science, King Mongku's University of Technology North Bangkok, Thailand.
- Tan, W., Zhang, Y., & Wang, X. (2019). Enhancing hydroponic farming productivity through IoT-based monitoring. Proceedings of the International Conference on Smart Agriculture, 1-6.
- Ting, K. C., Lin, T., & Davidson, P. C. (2016). LED lighting for urban agriculture. USDA Economic Research Service.
- Trollblad, V. (2016). Odling av Cucumis Sativus L. med aska från träd som näringstillägg i ett urinbaserat hydroponiskt system. Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemvetenskap, Lunds Universitet, Sweden.
- University of Arizona. (2019). Controlled Environment Agriculture Center. University of Arizona.
- Wang, C. (2024). Intelligent agricultural greenhouse control system based on Internet of Things and machine learning. arXiv preprint arXiv:2402.09488.
- Wang, L., & Zhang, H. (2021). Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(3), 1-9.
- Wikipedia
- Yang, J., & Zhang, L. (2015). Application of hydroponic systems for the treatment of source-separated human urine. *Ecological Engineering*, 81, 182–191.