

# เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมในยุคดิจิทัล 4.0

## Industrial Management Technology in the Digital Age 4.0

กฤตติกาญจน์ ธีระโชคสวัสดิ์, ภัทธีรา ประพฤติธรรม,  
พงศธร ฤทธิรงค์ และสุรัตน์ ตีรอด

Kitsikan Thirachoksawat, Pattira Prapruthum,  
Pongsathorn Rittirong and Surat Deerod

คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

Email: kitsikan8@gmail.com, pattira.puyy@gmail.com,

[pongsathornr@sau.ac.th](mailto:pongsathornr@sau.ac.th), [surad@sau.ac.th](mailto:surad@sau.ac.th)

Received: 2025-7-27; Revised: 2025-10-31; Accepted: 2025-10-31

### บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มุ่งเน้นการสำรวจและวิเคราะห์บทบาทของเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมในการขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมในยุคดิจิทัล โดยครอบคลุมการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหลักได้แก่ ปัญญาประดิษฐ์ (AI), Internet of Things (IoT), ระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ (Automation and Robotics), การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analytics) และเทคโนโลยีคลาวด์ (Cloud Technology) ในมิติของการบริหารจัดการ การผลิต และการควบคุมคุณภาพ บทความนี้ ได้นำเสนอแนวคิดและวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมตั้งแต่ยุคแรกเริ่มจนถึง Industry 4.0 พร้อมทั้งเจาะลึกถึงประเด็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ในด้านต่างๆ ของอุตสาหกรรม รวมถึงผลกระทบต่อการบริหารจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ ตลอดจนการยกระดับกระบวนการควบคุมคุณภาพให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ได้นำเสนอองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากบริษัท ความเข้าใจในการบูรณาการเทคโนโลยีเพื่อสร้างโรงงานอัจฉริยะและการผลิตที่ยั่งยืน บทสรุปของบทความได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการปรับตัวขององค์กรและบุคลากรเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยี พร้อมทั้งนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติ เพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมไทยสามารถก้าวทันการเปลี่ยนแปลงและสร้างรายได้เปรียบในการแข่งขันในเวทีโลก

**คำสำคัญ:** เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม, การบริหารจัดการ, การควบคุมคุณภาพ

### Abstract

This academic article explores and analyzes the role of industrial management technology in driving transformation and enhancing the competitiveness of the industrial sector in the digital age. It covers the application of key technologies, including the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Automation and Robotics, Big Data Analytics, and Cloud Technology, across various dimensions of management, production, and quality control. The article presents the concepts and evolution of industrial management technology from its early stages to Industry 4.0, exploring the practical applications of these technologies in various industrial domains. It delves into the impact of these technologies on supply chain and logistics management, as well as the enhancement of quality control processes for greater precision and efficiency. Furthermore, the article introduces new knowledge gained from



understanding the integration of technology to create smart factories and sustainable production. The conclusion emphasizes the importance of organizational and human adaptation to technological changes, providing recommendations for practical implementation to enable the Thai industrial sector to keep pace with global changes and gain a competitive advantage.

**Keywords:** Industrial Management Technology, Management, Quality Control

## บทนำ

ในศตวรรษที่ 21 โลกได้ก้าวสู่ยุคการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 (Industry 4.0) ซึ่งเกิดจากการหลอมรวมของเทคโนโลยีดิจิทัลกับระบบกายภาพและไซเบอร์อย่างเป็นระบบ นำไปสู่ความเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ทั้งในกระบวนการผลิต การบริหารจัดการ การดำเนินงาน และการสร้างคุณค่าใหม่ขององค์กร (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013; Lee, Bagheri, & Kao, 2014; Deloitte, 2020; McKinsey, 2021) เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมจึงมีบทบาทเป็น “กลไกเชิงยุทธศาสตร์” ที่ช่วยให้องค์กรปรับตัว เพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และสร้างความได้เปรียบเชิงการแข่งขันในตลาดโลกที่เปลี่ยนแปลงเร็วและซับซ้อนยิ่งขึ้น (McKinsey, 2021).

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ได้แก่ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ปัญญาประดิษฐ์ (AI) การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ ระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ ตลอดจนเทคโนโลยีคลาวด์ ได้ยกระดับสมรรถนะของห่วงโซ่คุณค่าตั้งแต่การวางแผนเชิงกลยุทธ์ การผลิต การควบคุมคุณภาพ ไปจนถึงการจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ โดยแกนกลางคือสถาปัตยกรรมไซเบอร์-กายภาพที่เชื่อมโยงข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อการตัดสินใจที่แม่นยำ (Lee et al., 2014) ขณะเดียวกัน การย้ายฟังก์ชันวิเคราะห์ขั้นสูงสู่คลาวด์และการวิเคราะห์บนบิ๊กดาต้าช่วยเร่งความเร็ว-ลดต้นทุนของการตัดสินใจเชิงปฏิบัติการและเชิงธุรกิจ (Demirkan & Delen, 2013; IBM, 2024).

อย่างไรก็ดี การนำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปใช้ให้เกิด “คุณค่า” อย่างยั่งยืนไม่ใช่เรื่องง่าย องค์กรเผชิญความท้าทายด้านเงินลงทุน การบูรณาการระบบเดิมกับระบบใหม่ ความซับซ้อนของสถาปัตยกรรมข้อมูล การกำกับความเสี่ยง/ความน่าเชื่อถือ และ—ที่สำคัญ—ช่องว่างทักษะของบุคลากรและการเปลี่ยนแปลงวัฒนธรรมองค์กร (McKinsey, 2021; SHRM, 2021). ด้วยเหตุนี้ การทำความเข้าใจ “หลักคิด-หลักการ-แนวทางปฏิบัติ” ของเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมอย่างเป็นระบบจึงจำเป็นต่อผู้ประกอบการ นักวิชาการ และผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ตลอดจนการวางกรอบพัฒนาที่เน้น “มนุษย์เป็นศูนย์กลาง” ตามเจตนารมณ์ Industry 5.0 เพื่อความยั่งยืนและความยืดหยุ่นของระบบอุตสาหกรรม (European Commission, 2021).

ด้วยเหตุนี้ งานศึกษานี้จึงมุ่งสำรวจและวิเคราะห์บทบาทของเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมในปัจจุบัน โดยเน้นการประยุกต์ใช้ IoT, AI/Analytics, Automation & Robotics และ Cloud ต่อการบริหารจัดการ การผลิต และการควบคุมคุณภาพ พร้อมสังเคราะห์องค์ความรู้และแนวปฏิบัติที่บูรณาการข้ามโดเมนเพื่อใช้เป็นแนวทางพัฒนาและยกระดับขีดความสามารถของอุตสาหกรรมไทยสู่ Smart Industry ที่แข่งขันได้และยั่งยืน (Deloitte, 2020; McKinsey, 2021; IBM, 2024).

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อสำรวจและอธิบายแนวคิดพื้นฐานและวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม ตั้งแต่ยุคเริ่มต้นจนถึงการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0

2. เพื่อวิเคราะห์และนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหลักในภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ Internet of Things (IoT), ปัญญาประดิษฐ์ (AI), การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analytics), ระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ (Automation and Robotics) และเทคโนโลยีคลาวด์ (Cloud Technology).

3. เพื่อศึกษาบทบาทของเทคโนโลยีในการยกระดับการบริหารจัดการในอุตสาหกรรม ทั้งในด้านการวางแผนกลยุทธ์ การจัดการการผลิตและปฏิบัติการ และการจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์

4. เพื่อแสดงให้เห็นถึงการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการควบคุมคุณภาพในภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพแบบเรียลไทม์ การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ และการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง

5. เพื่อสังเคราะห์องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการบูรณาการเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม และเสนอแนะแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติ

### การทบทวนวรรณกรรม

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา งานศึกษาด้าน “เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม” เติบโตอย่างก้าวกระโดดควบคู่กับการก้าวสู่ยุคการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 (Industry 4.0) ซึ่งเกิดจากการหลอมรวมระหว่างโลกดิจิทัล-กายภาพ-ไซเบอร์ และเปลี่ยนโฉมทั้งกระบวนการผลิต การบริหารจัดการ และรูปแบบการสร้างคุณค่า (value creation) ขององค์กรอย่างเป็นระบบ (Kagermann et al., 2013; Lee et al., 2015; Hermann et al., 2016).

หนึ่งในแกนกลางของ Industry 4.0 คือ Cyber-Physical Systems (CPS), Internet of Things (IoT/IIoT) และ Big Data Analytics ที่เชื่อมข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อยกระดับ “โรงงานอัจฉริยะ” (Smart Factory) ให้รับรู้-ตัดสินใจ-ปรับตัวได้เอง งานของ Lee และคณะ (5C CPS architecture) แสดงสถาปัตยกรรมเชิงปฏิบัติสำหรับระบบผลิตยุคใหม่ ขณะที่วรรณกรรมรีวิวด้าน “intelligent manufacturing” ชี้ให้เห็นบทบาทของ IoT-enabled manufacturing และคลาวด์ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพตลอดห่วงโซ่คุณค่า (Lee et al., 2015; Zhong et al., 2017).

ในบริบทอุตสาหกรรม IIoT ถูกใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานข้อมูลสำหรับการมอนิเตอร์กระบวนการแบบเรียลไทม์ การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ และการจัดการสินทรัพย์ระดับโรงงานอย่างเป็นระบบ โดยงานวิจัยของ Xu, He และ Li (2014) สรุป “สถานะองค์ความรู้” และโอกาส/ความท้าทายของ IIoT ได้อย่างเป็นระบบ (Xu et al., 2014).

ด้าน ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (ML) มีบทบาทเด่นในการแปลงข้อมูลการผลิตเป็น “การตัดสินใจที่มีหลักฐานรองรับ” ทั้งในมิติการควบคุมคุณภาพ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และการพยากรณ์เหตุขัดข้อง งานคลาสสิกกว่าด้วยการนำ Analytics/Big Data บนคลาวด์เข้าไปอยู่ใน *decision support systems* แสดงให้เห็นช่องทางสร้างคุณค่าทางปฏิบัติการอย่างเป็นขั้นตอน (Demirkan & Delen, 2013) และหลักฐานเชิงประจักษ์ว่าความสามารถด้าน Big Data Analytics เชื่อมโยงกับผลการดำเนินงานขององค์กรผ่าน *dynamic capabilities* (Wamba et al., 2017).

ในส่วนของ ระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ แนวโน้มสำคัญคือ หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน (cobots) ที่ทำงานข้างมนุษย์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นความปลอดภัยและลดงานซ้ำซาก ขณะเดียวกัน การจัดการวัสดุในคลังและสายการผลิตอัตโนมัติ AGVs/AMRs และระบบ AS/RS มากขึ้น ซึ่งวรรณกรรมรีวิวล่าสุดชี้ว่าการบูรณาการหุ่นยนต์เคลื่อนที่และระบบจัดเก็บ-กู้คืนอัตโนมัติช่วยยกระดับความเร็ว ความถูกต้อง และต้นทุนต่อหน่วยอย่างมีนัยสำคัญ (เช่น รีวิวลคลังสินค้าอัตโนมัติ/หุ่นยนต์ และงานประเมินระบบ AGV) (Robotized & Automated Warehouse Systems Review; Qi et al., 2018).

โดยสรุป อุตสาหกรรมที่ต้องการเปลี่ยนผ่านสู่ Smart Factory/Smart Industry ควรมองเทคโนโลยีหลัก (CPS-IIoT-Analytics/AI-Automation-Cloud) เป็น “สถาปัตยกรรมบูรณาการ” มากกว่าชุดเครื่องมือ

แยกส่วน พร้อมพัฒนา *capabilities* เชิงองค์กรและบุคลากรเพื่อแปลงเทคโนโลยีเป็นผลลัพธ์เชิงประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นของระบบในระยะยาว (Hermann et al., 2016; Wamba et al., 2017).

### การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analytics)

การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่เป็นหัวใจของการเปลี่ยน “ข้อมูลดิบ” ให้เป็น “องค์ความรู้ที่นำไปใช้ได้จริง” เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ขององค์กร แนวคิด 3V—ปริมาณ (Volume) ความเร็ว (Velocity) และความหลากหลาย (Variety)—ถูกเสนอเพื่ออธิบายคุณลักษณะสำคัญของ Big Data และความท้าทายในการจัดการข้อมูลยุคใหม่ (Laney, 2001) งานวิจัยเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้ Big Data Analytics ที่เชื่อมโยงกระบวนการรวบรวม จัดเก็บ และวิเคราะห์ข้อมูลจากหลายแหล่งอย่างเป็นระบบ สามารถยกระดับประสิทธิภาพการดำเนินงาน ปรับปรุงคุณภาพ ตลอดจนสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างมีนัยสำคัญ (Wamba et al., 2017)

### เทคโนโลยีคลาวด์ (Cloud Technology)

เทคโนโลยีคลาวด์ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลสำคัญสำหรับ Industry 4.0 ช่วยลดต้นทุน เพิ่มความยืดหยุ่นของทรัพยากร และเอื้อต่อการทำงานร่วมกันภายในและระหว่างองค์กร (Marston et al., 2011) นอกจากนี้ คลาวด์ยังทำหน้าที่เป็นแพลตฟอร์มสำคัญสำหรับการจัดการข้อมูลจากระบบอุตสาหกรรมเชิงไซเบอร์-กายภาพ/IIoT และรองรับการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ในระดับสเกลได้ (Tsai, Lai, & Chao, 2015)

**สรุปและช่องว่างการวิจัย** วรรณกรรมชี้ให้เห็นการเติบโตอย่างรวดเร็วของงานวิจัยด้านเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม โดยมุ่งเน้นการบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อสร้างระบบการผลิตที่ชาญฉลาด มีประสิทธิภาพ และยืดหยุ่น อย่างไรก็ตาม ยังมี “ช่องว่าง” ที่ควรสำรวจเพิ่มเติม ได้แก่ (1) การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมระยะยาวของการนำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปใช้ (2) การพัฒนาโมเดลการจัดการที่เหมาะสมกับบริบทอุตสาหกรรมแต่ละประเภท และ (3) การสร้างกรอบการพัฒนาทักษะบุคลากรให้สอดคล้องกับสมรรถนะดิจิทัลในยุคข้อมูลเป็นศูนย์กลาง

### 1. แนวคิดและวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม

**เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม (Industrial Management Technology)** คือศาสตร์บูรณาการระหว่างวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีสารสนเทศ และการจัดการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน ยกระดับคุณภาพ และเร่งนวัตกรรมทั้งในภาคการผลิตและบริการ โดยครอบคลุมวงจรการบริหารทั้งหมด—การวางแผน การจัดองค์กร ภาวะผู้นำ การควบคุม และการปรับปรุงต่อเนื่อง—เพื่อให้บรรลุเป้าหมายเชิงกลยุทธ์อย่างยั่งยืน (ดูแนววรรณกรรมภาพรวมใน Groover, 2015; Stevenson, 2021)

**วิวัฒนาการตามคลื่นการปฏิวัติอุตสาหกรรม** สะท้อนความเชื่อมโยงระหว่างความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีกับกรอบคิดการจัดการ ดังนี้

- **อุตสาหกรรม 1.0:** การใช้พลังงานไอน้ำและเครื่องจักรกลทำให้เกิดการผลิตจำนวนมากและการรวมศูนย์ในโรงงาน แนวทางการจัดการมุ่งจัดระเบียบแรงงานและใช้เครื่องจักรให้เต็มศักยภาพ (Mokyr, 1998)
- **อุตสาหกรรม 2.0:** ไฟฟ้าและสายพานการผลิตทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หลัก การจัดการเชิงวิทยาศาสตร์ ของ Frederick W. Taylor ว่าด้วยการวัดงาน มาตรฐานเวลา และแรงจูงใจทางค่าตอบแทนถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ขณะเดียวกันการไหลแบบสายพานและการผลิตจำนวนมากตามแบบ Henry Ford กลายเป็นมาตรฐาน (Taylor, 1911; Ford, 1922) ต่อมาถูกต่อยอดสู่แนวคิด Lean Production เพื่อลดความสูญเปล่าอย่างเป็นระบบ (Womack, Jones, & Roos, 1990)

- **อุตสาหกรรม 3.0:** การผนวกระบบอิเล็กทรอนิกส์ ไอที คอมพิวเตอร์ และระบบอัตโนมัติ สู่กระบวนการผลิต ทำให้การควบคุมแม่นยำและยืดหยุ่นขึ้น การตัดสินใจใช้ข้อมูล (data-driven) เริ่มเด่นชัดในสายการผลิตและซัพพลายเชน (Groover, 2015)
- **อุตสาหกรรม 4.0:** การหลอมรวมโลกดิจิทัล-กายภาพผ่าน Cyber-Physical Systems ร่วมกับ IoT, Big Data/AI, Cloud, Robotics และ Additive Manufacturing เพื่อสร้าง โรงงานอัจฉริยะ ที่เชื่อมต่อ สื่อสาร และปรับตัวได้แบบเรียลไทม์ (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013; Lee, Bagheri, & Kao, 2015; Schwab, 2016) กรอบการจัดการจึงต้องเน้นสถาปัตยกรรมข้อมูล การวิเคราะห์เชิงทำนาย/สั่งการ (predictive & prescriptive analytics) การบูรณาการซัพพลายเชนแบบ end-to-end และการพัฒนาสมรรถนะดิจิทัลของบุคลากร

**นัยเชิงจัดการ:** การเข้าใจพัฒนาการทั้งสี่ระลอกช่วยให้ผู้บริหารเลือกใช้เทคโนโลยีและแนวคิดการจัดการที่ “เหมาะสมตามบริบท” (contingent) ตั้งแต่การออกแบบกระบวนการ การลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล ไปจนถึงการยกระดับทักษะทีมงาน เพื่อสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันในยุคดิจิทัลที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว

## 2. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในด้านต่างๆ ของอุตสาหกรรม

### 2.1 เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (ICT) และ Internet of Things (IoT/IIoT)

ICT คือโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลที่ทำให้ “ข้อมูลไหลเวียนและร่วมปฏิบัติการ” ระหว่างอุปกรณ์ เครื่องจักร ระบบ และบุคลากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริบท Industry 4.0 ซึ่งต้องพึ่งพาการเชื่อมต่อแบบเรียลไทม์และสถาปัตยกรรมข้อมูลปลายทาง-ถึง-ปลายทาง (end-to-end) (Atzori, Iera, & Morabito, 2010) [ScienceDirect](#) หัวใจสำคัญคือ Internet of Things (IoT) และการประยุกต์ใช้ในภาคการผลิตหรือ Industrial IoT (IIoT) ที่เชื่อมโยงเครือข่ายของเซ็นเซอร์ เครื่องจักร และระบบควบคุมเข้ากับแพลตฟอร์มประมวลผล เพื่อเก็บ-แลกเปลี่ยน-วิเคราะห์ข้อมูลแบบทันทีและป้อนกลับสู่การควบคุม (Lee, Bagheri, & Kao, 2015)

ตัวอย่างการประยุกต์ IIoT ที่เห็นผลเด่นชัด ได้แก่

- **การตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตแบบเรียลไทม์:** เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ความดัน การสั่นสะเทือน และค่าสถานะต่าง ๆ ส่งข้อมูลสู่ศูนย์กลางเพื่อคุณภาพและลดของเสีย (Atzori et al., 2010; Lee et al., 2015).
- **การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance):** วิเคราะห์สัญญาณ/เหตุการณ์จากเครื่องจักรเพื่อทำนายความขัดข้อง วางแผนหยุดซ่อมล่วงหน้า ลด Downtime และยืดอายุสินทรัพย์ (Carvalho et al., 2019; Zhang, Yang, & Wang, 2019).
- **การจัดการพลังงานอัจฉริยะ:** มองเห็นการใช้พลังงานรายจุด/รายเครื่อง ช่วยสืบค้นคอขวด และปรับพฤติกรรมโหลด (กรอบงาน IIoT ตาม Atzori et al., 2010).
- **การติดตามสินทรัพย์และคลังสินค้า:** ติดตามตำแหน่ง-สภาพของวัสดุ/งานระหว่างทำ ช่วยแม่นยำเรื่องสต็อกและลดสูญหาย (Atzori et al., 2010).
- **ความปลอดภัยในการทำงาน:** IIoT ตรวจสอบสภาพแวดล้อมเสี่ยงและแจ้งเตือนอัตโนมัติ ช่วยลดอุบัติเหตุ (Lee et al., 2015).

สรุป: ICT+IIoT ทำให้โรงงาน “มองเห็น-เข้าใจ-ตัดสินใจ” ได้เร็วขึ้นบนข้อมูลจริง ยกระดับ OEE คุณภาพ และความยืดหยุ่นของสายการผลิต

### 2.2 ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML)

AI/ML เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ระบบ “เรียนรู้จากข้อมูล” เพื่อตัดสินใจ/ควบคุมงานอัตโนมัติที่ซับซ้อน ตั้งแต่การอนุมานเชิงสถิติ การเรียนรู้เชิงลึก ไปจนถึงการวางแผน (Russell & Norvig, 2010) ในบริบทอุตสาหกรรม การบูรณาการ AI เข้ากับข้อมูลจาก IIoT/ระบบปฏิบัติการผลิต ช่วยเพิ่มผลผลิต ลดของเสีย และ



รองรับการตัดสินใจแบบทำนาย-สั่งการ (Wang, Ma, & Wang, 2018; Carvalho et al., 2019) กรณีใช้หลัก ๆ ได้แก่

- **การควบคุมคุณภาพด้วยวิสัยทัศน์คอมพิวเตอร์:** โมเดลการเรียนรู้เชิงลึกใช้ภาพ/วิดีโอเพื่อตรวจสอบบกพร่องบนผิว ตรวจสอบการประกอบ และคัดแยกอัตโนมัติ ซึ่งมักทำได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าการตรวจด้วยสายตา (Kim et al., 2021; Ren et al., 2022; Wang et al., 2018).
- **การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต:** ML วิเคราะห์ Big Data จากกระบวนการเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ลดของเสีย/เวลารอคอย และเพิ่ม Throughput พร้อมทั้งช่วยวางแผนการผลิต-จัดตาราง-จัดสรรทรัพยากร (Wang et al., 2018).
- **การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ขั้นสูง:** ผสาน AI/ML กับสัญญาณจากเซ็นเซอร์และประวัติการซ่อมเพื่อลดเหตุขัดข้องที่คาดไม่ถึงและต้นทุนซ่อม (Carvalho et al., 2019; Zhang et al., 2019).
- **ซัพพลายเชนเชิงทำนาย:** AI ใช้คาดการณ์อุปสงค์ ควบคุมสต็อก และเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่ายโลจิสติกส์ โดยงานทบทวนล่าสุดชี้ว่า AI ยกระดับความแม่นยำในการพยากรณ์และความยืดหยุ่นของซัพพลายเชนได้จริง (Pournader et al., 2021; Mediavilla et al., 2022).

สรุป: AI/ML ทำหน้าที่เสมือน “ชั้นสมอง” ของโรงงานอัจฉริยะ—แปลงข้อมูลปฏิบัติการให้เป็นการตัดสินใจที่วัดผลได้ ตั้งแต่คุณภาพ การซ่อมบำรุง ไปถึงการวางแผนซัพพลายเชน

### ประเด็นสำคัญ : การบริหารจัดการในยุคเทคโนโลยี (Technology-driven Management)

ในยุคที่เทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามามีบทบาทต่อทุกภาคส่วนของอุตสาหกรรม การบริหารจัดการจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนแนวคิดจากรูปแบบเดิมสู่การจัดการที่ขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี (Technology-driven Management) ซึ่งหมายถึง “การบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ากับทุกกระบวนการบริหาร” เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความยืดหยุ่น และขีดความสามารถในการแข่งขันขององค์กร (McKinsey & Company, 2021). การเปลี่ยนผ่านนี้ครอบคลุมทั้งการวางกลยุทธ์ การผลิต ซัพพลายเชน คุณภาพ และการพัฒนาทักษะบุคลากรให้พร้อมต่อการทำงานในระบบอัจฉริยะ.

#### การวางแผนและกลยุทธ์

กลยุทธ์ในยุคเทคโนโลยีต้องตั้งอยู่บน “ข้อมูลเชิงลึก” จาก Big Data Analytics และ AI ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารเข้าใจแนวโน้มตลาด พฤติกรรมผู้บริโภค และขีดความสามารถของคู่แข่งได้อย่างแม่นยำ ข้อมูลนี้สนับสนุนการกำหนดวิสัยทัศน์ พันธกิจ และเป้าหมายองค์กรที่วัดผลได้ (Deloitte Insights, 2020). นอกจากนี้การวางแผนยังต้องคำนึงถึง การลงทุนในเทคโนโลยี การยกระดับทักษะดิจิทัล และการสร้างวัฒนธรรมองค์กรที่ส่งเสริม *continuous learning* และ innovation เพื่อให้เทคโนโลยีถูกใช้ได้เต็มศักยภาพ.

#### การจัดการการผลิตและปฏิบัติการ

เทคโนโลยีได้ปฏิวัติรูปแบบการผลิตสู่โรงงานอัจฉริยะ (Smart Factory) ซึ่งบูรณาการ IIoT, AI, Robotics และ Automation เข้าด้วยกัน ระบบสามารถควบคุม ตรวจสอบ และปรับพารามิเตอร์การผลิตแบบเรียลไทม์ ทำให้เกิด *mass customization* และ *flexible manufacturing* (Kagermann et al., 2013; Lee et al., 2015). ระบบ MES (Manufacturing Execution System) และ ERP ที่เชื่อมโยงกับเทคโนโลยีเหล่านี้เปิดโอกาสให้ผู้บริหารติดตามประสิทธิภาพเครื่องจักร ทรัพยากร และผลผลิตได้แบบทันที (SAP, n.d.) นำไปสู่การตัดสินใจเชิงข้อมูลที่รวดเร็วและลดของเสียในกระบวนการ.

#### การจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์

โซ่อุปทานยุคดิจิทัลต้องการ “ความโปร่งใส ความเร็ว และความยืดหยุ่น” เทคโนโลยีหลักที่สนับสนุนได้แก่

- **Blockchain** – ใช้สร้างความโปร่งใส ตรวจสอบย้อนกลับ และความน่าเชื่อถือของข้อมูล ช่วยยืนยันแหล่งที่มาและคุณภาพสินค้า (IBM, n.d.).

- **AI และ Machine Learning** – ใช้ในการคาดการณ์อุปสงค์ เพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางขนส่ง และระบุความเสี่ยงในโซ่อุปทาน (Pournader et al., 2021).
- **IoT / IIoT** – ติดตามตำแหน่งสินค้า ตรวจสอบสภาพแวดล้อมขณะขนส่ง (อุณหภูมิ ความชื้น แสงสั่นสะเทือน) เพื่อรักษาคุณภาพสินค้า.
- **Robotics และ Automation** – ใช้ในคลังสินค้าอัตโนมัติ (Automated Warehouses) และ พาหนะขนส่งไร้คนขับ (AGVs/AMRs) เพื่อเพิ่มความรวดเร็วและลดความผิดพลาด (Accenture, 2023).

### การควบคุมคุณภาพด้วยเทคโนโลยี (Technology-enabled Quality Control)

การควบคุมคุณภาพเป็นองค์ประกอบสำคัญของการผลิต และเทคโนโลยีได้ยกระดับให้แม่นยำและทันการณ์กว่าเดิม (ASQ, n.d.)

- **การตรวจสอบคุณภาพแบบเรียลไทม์:** เซ็นเซอร์ IIoT เก็บข้อมูลอุณหภูมิ ความดัน และ แสงสั่นสะเทือนระหว่างการผลิตส่งต่อระบบวิเคราะห์ทันที (RF Page, 2025).
- **Machine Vision และ AI:** ระบบกล้องความละเอียดสูงและ AI วิเคราะห์ภาพเพื่อตรวจสอบร่องขนาด หรือการประกอบ โดยเรียนรู้จากตัวอย่างผลิตภัณฑ์จริง (NetSuite, 2024).
- **Big Data Analytics:** วิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากจากสายการผลิต เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหาคุณภาพและแนวโน้มความผิดพลาด ช่วยแก้ไขตั้งแต่ต้นทาง.
- **Predictive Maintenance:** ใช้ IIoT และ AI/ML วิเคราะห์ข้อมูลเครื่องจักรเพื่อคาดการณ์ความขัดข้อง ลด downtime และรักษาคุณภาพการผลิต (Splunk, n.d.).
- **Continuous Process Improvement:** เทคโนโลยีจำลอง (Digital Twin & Simulation) และ Lean/Six Sigma ช่วยให้องค์กรตรวจจับ คอขวด จำลองการปรับปรุงก่อนนำไปใช้จริง และ ติดตามผลได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม (George et al., 2022).

สรุปการบริหารจัดการในยุคเทคโนโลยีไม่ใช่เพียงการ “นำเทคโนโลยีมาใช้” แต่คือ การเปลี่ยนกระบวนการ ทัศนคติการบริหารทั้งหมด องค์กรต้องใช้ข้อมูลและระบบดิจิทัลเป็นศูนย์กลางในการตัดสินใจ ปรับโครงสร้าง กระบวนการ และบุคลากร เพื่อสร้างองค์กรที่ยั่งยืนและพร้อมแข่งขันในเศรษฐกิจดิจิทัลที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว.

### องค์ความรู้ใหม่

จากการศึกษาและวิเคราะห์เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมในยุคดิจิทัล พบว่าองค์ความรู้ ใหม่ที่สำคัญคือการบูรณาการเทคโนโลยีต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อสร้างระบบนิเวศอุตสาหกรรมที่ชาญฉลาดและยั่งยืน (Smart and Sustainable Industrial Ecosystem) แนวคิดนี้ก้าวข้าม การนำ เทคโนโลยีแต่ละชนิดมาใช้ แยกกัน แต่เน้นการเชื่อมโยงและทำงานร่วมกันของ IoT, AI, Big Data, Cloud Computing, Robotics และ Automation เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด องค์ความรู้ที่สำคัญคือการตระหนักว่า Industry 4.0 ไม่ใช่เพียงแค่นำ เทคโนโลยีมาใช้ แต่ เป็นการเปลี่ยนแปลงกระบวนการ ทัศนคติในการบริหารจัดการ การผลิต และการควบคุมคุณภาพอย่างสิ้นเชิง องค์กรที่ประสบความสำเร็จในยุคนี้จะต้องมีความสามารถในการรวบรวม วิเคราะห์และ ใช้ประโยชน์จาก น ข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อประกอบการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์และ ปฏิบัติการ นอกจากนี้ การพัฒนาบุคลากรให้มีทักษะด้านดิจิทัลและมีความเข้าใจใน เทคโนโลยีเหล่านี้เป็น สิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับระบบอัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ การสร้างโรงงาน อัจฉริยะ (Smart Factory) ที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลและเทคโนโลยีขั้นสูงเป็นเป้าหมายหลักของ Industry 4.0 ซึ่งจะ ซึ่งนำไปสู่การผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ลดของเสีย ลดการใช้ พลังงาน และเพิ่มความสามารถในการ ปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของตลาด การผลิตที่ยั่งยืน (Sustainable Manufacturing) เป็นอีกหนึ่งองค์



ความรู้ที่ได้รับ โดยเทคโนโลยีช่วยให้สามารถ ติดตามและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การออกแบบ การผลิต ไปจนถึงการกำจัด

## บทสรุป

เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมได้ก้าวข้ามจากการเป็นเพียงเครื่องมือสนับสนุนไปสู่การเป็น หัวใจสำคัญในการขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลงและสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันในภาค อุตสาหกรรมยุคใหม่ การปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 ได้นำ มาซึ่งการหลอมรวมเทคโนโลยีดิจิทัลและกายภาพเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดนวัตกรรมและประสิทธิภาพที่ไม่เคยมีมาก่อน ตั้งแต่ Internet of Things (IoT) ที่เชื่อมโยงอุปกรณ์และเครื่องจักรเข้าด้วยกัน ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ ของเครื่อง (Machine Learning) ที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจ ระบบอัตโนมัติและ หุ่นยนต์ที่เพิ่มความแม่นยำและลดภาระงาน ไปจนถึงการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analytics) และเทคโนโลยีคลาวด์ (Cloud Technology) ที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญในการ จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ได้ปฏิวัติวิธีการบริหารจัดการในอุตสาหกรรม ตั้งแต่การวางแผนกลยุทธ์ที่อาศัยข้อมูลเชิงลึก การจัดการการผลิตและปฏิบัติการที่ยืดหยุ่นและมี ประสิทธิภาพ ไปจนถึงการบริหารจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ที่โปร่งใสและตอบสนองได้ รวดเร็ว นอกจากนี้ เทคโนโลยียังได้ยกระดับการควบคุมคุณภาพให้ก้าวไปอีกขั้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพแบบเรียลไทม์ การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ และการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง ซึ่งช่วยลดของเสีย เพิ่มผลผลิต และรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการศึกษารังนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการบูรณาการเทคโนโลยี อย่างเป็นระบบ การตัดสินใจที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล การเปลี่ยนผ่านจากระบบอัตโนมัติไปสู่ระบบ ที่สามารถตัดสินใจได้ด้วยตนเอง และการยกระดับคุณภาพด้วยแนวทางเชิงพยากรณ์และเชิง แนะนำ ที่สำคัญที่สุดคือการตระหนกว่าบทบาทของมนุษย์ในยุคดิจิทัลไม่ได้ลดลง แต่เปลี่ยนไปสู่ การเป็นผู้ที่มีทักษะขั้นสูงในการควบคุม ดูแล และสร้างสรรค์นวัตกรรม โดยสรุป การนำ เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับ องค์กรที่ต้องการความอยู่รอดและเติบโตในสภาพแวดล้อมทางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และมีการแข่งขันสูง การลงทุนในเทคโนโลยีการพัฒนาบุคลากร และการปรับเปลี่ยนวัฒนธรรม องค์กรให้พร้อมรับมือกับการเปลี่ยนแปลง จึงเป็นก้าวสำคัญที่จะนำพาภาคอุตสาหกรรมไปสู่ยุค แห่งความชาญฉลาดและยั่งยืน.

## ข้อเสนอแนะ

1. การลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล: องค์กรควรพิจารณาการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานที่ จำเป็น สำหรับการเชื่อมโยงและประมวลผลข้อมูล เช่น แพลตฟอร์ม IIoT, ระบบคลาวด์และ ระบบรักษาความปลอดภัยทางไซเบอร์เพื่อรองรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง.
2. การพัฒนาบุคลากร: สิ่งสำคัญคือการลงทุนในการพัฒนาทักษะ (Upskilling) และการเรียน รู้ทักษะใหม่ (Reskilling) ของบุคลากรในทุกระดับ โดยเน้นทักษะด้านดิจิทัล การวิเคราะห์ ข้อมูล การใช้AI และการทำงานร่วมกับระบบอัตโนมัติเพื่อให้บุคลากรสามารถปรับตัวและ ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยี ได้อย่างเต็มที่.
3. การสร้างวัฒนธรรมองค์กรที่เปิดรับนวัตกรรม: ผู้บริหารควรส่งเสริมวัฒนธรรมองค์กรที่ เปิดกว้างต่อการเปลี่ยนแปลง การทดลอง และการเรียนรู้จากความผิดพลาด เพื่อให้ พนักงานกล้าที่จะนำ เทคโนโลยีใหม่ๆ มาประยุกต์ใช้และสร้างสรรค์นวัตกรรม.
4. การบูรณาการระบบอย่างเป็นขั้นตอน: การนำ เทคโนโลยีมาใช้ควรดำเนินการอย่างเป็นขั้นตอน โดยเริ่มจากการประเมินความพร้อมขององค์กร กำหนดเป้าหมายที่ชัดเจน และ เลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับบริบทและความต้องการของธุรกิจ เพื่อให้การเปลี่ยนผ่าน เป็นไปอย่างราบรื่นและยั่งยืน.

5. การให้ความสำคัญกับความปลอดภัยทางไซเบอร์: เมื่อมีการเชื่อมโยงระบบและข้อมูลมากขึ้น ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย องค์กรจึงต้องให้ความสำคัญกับการวางแผนและดำเนินการด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์อย่างเข้มงวด เพื่อ ปกป้องข้อมูลและระบบจากการโจมตี

### เอกสารอ้างอิง

- Accenture. (2023). *The supply chain of the future: Digital logistics and automation*. Accenture Insights. Retrieved from <https://www.accenture.com>
- ASQ. (n.d.). *What is quality control?* American Society for Quality. Retrieved from <https://asq.org>
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- Deloitte Insights. (2020). *Digital transformation 2020: Strategy and leadership in the age of AI*. Deloitte University Press.
- Deloitte. (2020). *Industry 4.0: The future of manufacturing*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0.html>
- Demirkan, H., & Delen, D. (2013). Leveraging the capabilities of service-oriented decision support systems: Putting analytics and big data in cloud. *Decision Support Systems*, 55(1), 412–421. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.048>
- Demirkan, H., & Delen, D. (2013). Leveraging the capabilities of service-oriented decision support systems: Putting analytics and big data in cloud. *Decision Support Systems*, 55(1), 412–421. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.048>
- European Commission. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/308407>
- Ford, H. (1922). *My life and work*. Garden City, NY: Doubleday.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2022). *The lean six sigma pocket toolbook* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Groover, M. P. (2015). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for *Industrie 4.0* scenarios: A literature review. In *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- IBM. (2024). *How is AI being used in manufacturing*. <https://www.ibm.com/think/topics/ai-in-manufacturing>
- IBM. (n.d.). *Blockchain for supply chain transparency*. IBM Blockchain Solutions. Retrieved from <https://www.ibm.com/blockchain>

- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry (Final report of the Industrie 4.0 Working Group)*. Forschungsunion.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry (Final report of the Industrie 4.0 Working Group)*. Forschungsunion.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. acatech—National Academy of Science and Engineering.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industry 4.0 Working Group*. acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Kim, T.-H., Yu, J., Park, S., & Kim, J. (2021). Product inspection methodology via deep learning. *Sensors*, 21(15), 5039. <https://doi.org/10.3390/s21155039>
- Laney, D. (2001). *3D data management: Controlling data volume, velocity, and variety*. META Group (Research Note).
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.01.001>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001> ScienceDirect
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Marston, S., Li, Z., Bandyopadhyay, S., Zhang, J., & Ghalsasi, A. (2011). Cloud computing—The business perspective. *Decision Support Systems*, 51(1), 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.006>
- McKinsey & Company. (2021). *The case for digital transformation: How technology is reshaping management and operations*. McKinsey Digital.
- McKinsey. (2021). *Industry 4.0: Reimagining manufacturing operations*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/industry-4-0-reimagining-manufacturing-operations>

- Mediavilla, M. A., et al. (2022). Review and analysis of artificial intelligence methods for supply chain management. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(8), 2033–2062. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01963-8> ScienceDirect
- Mokyr, J. (1998). The second industrial revolution, 1870–1914. In *The Oxford encyclopedia of economic history*. Oxford University Press.
- NetSuite. (2024). *AI-driven quality inspection and manufacturing analytics*. Oracle NetSuite White Paper. Retrieved from <https://www.netsuite.com>
- Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2021). Artificial intelligence applications in supply chain management: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 241, 108250. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108250>
- Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2021). Artificial intelligence applications in supply chain management: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 241, 108250. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108250>
- Qi, M., Zhou, X., Zou, B., & Zhang, Y. (2018). On the evaluation of AGVS-based warehouse operation systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.03.013>
- Ren, Z., et al. (2022). State of the art in defect detection based on machine vision. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9, 611–640. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6> SpringerLink
- RF Page. (2025). *Real-time quality monitoring in smart factories*. RF Page Technology Review. Retrieved from <https://rfpage.com>
- Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments. (2019). *ResearchGate preprint*. (Comprehensive review of shuttle-based AS/RS, robotic handling, etc.).
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: A modern approach* (3rd ed.). Pearson. (Global edition preview)
- SAP. (n.d.). *Manufacturing execution systems (MES) and ERP integration*. SAP Knowledge Center. Retrieved from <https://www.sap.com>
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum.
- SHRM (Society for Human Resource Management). (2021). *The future of work: A journey to 2022*. <https://www.shrm.org/hr-today/trends-and-forecasting/research-and-surveys/pages/future-of-work-report.aspx>
- Splunk. (n.d.). *Predictive maintenance with IoT and machine learning*. Splunk Industrial Data Analytics. Retrieved from <https://www.splunk.com>
- Stevenson, W. J. (2021). *Operations management* (14th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. New York, NY: Harper & Brothers.
- Tsai, C.-W., Lai, C.-F., & Chao, H.-C. (2015). Data mining for the Internet of Things: A survey. *Information Sciences*, 318, 64–86. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.02.027>



- Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Akter, S., Ren, S. J.-F., Dubey, R., & Childe, S. J. (2017). Big data analytics and firm performance: Effects of dynamic capabilities. *Journal of Business Research, 70*, 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.009>
- Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Akter, S., Ren, S. J.-F., Dubey, R., & Childe, S. J. (2017). Big data analytics and firm performance: Effects of dynamic capabilities. *Journal of Business Research, 70*, 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.009>
- Wang, J., Ma, Y., & Wang, L. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems, 48*, 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The machine that changed the world*. New York, NY: Rawson Associates.
- Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2014). Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10*(4), 2233–2243. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>
- Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal, 13*(3), 2213–2227. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905565>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. *Engineering, 3*(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>