

ADAPTASI DAN INTEGRASI TEKNIK KIMIA DI ERA INDUSTRI 4.0



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Teknik Kimia
pada Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Tanggal 1 Desember 2022**

**oleh:
Prof. Dr. Ir. Sarto, M.Sc., IPU.**

Bismillahirrohmannirohim

Yang terhormat,

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat;

Rektor dan Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar;

Dekan dan Wakil Dekan, Ketua dan Sekretaris Senat Fakultas Teknik,

Rekan-rekan sejawat dosen, dan segenap sivitas akademika

Universitas Gadjah Mada;

Para tamu undangan, keluarga yang saya cintai, serta hadirin sekalian yang saya hormati.

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Selamat pagi, salam sejahtera bagi kita semuanya.

Alhamdulillahillobbil 'alamin, puji syukur ke hadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga pada hari ini kita dapat hadir di Balai Senat ini dalam keadaan sehat dan sejahtera. Sebagai salah satu kewajiban seorang guru besar Universitas Gadjah Mada, saya akan menyampaikan pidato pengukuhan dengan judul:

ADAPTASI DAN INTEGRASI TEKNIK KIMIA DI ERA INDUSTRI 4.0

Ada beberapa definisi teknik kimia, yang pada prinsipnya adalah mendirikan pabrik kimia yang dimulai dari ide dasar sampai operasinya, melalui beberapa tahapan, antara lain penelitian proses, pengembangan proses, perancangan pabrik, konstruksi pabrik, operasi pabrik dan teknik riset pasar (Harper, 1954), yang menguntungkan tanpa mengganggu keseimbangan lingkungan. Sebagaimana sifat umum ilmu dan teknologi, teknik kimia selalu mengalami perkembangan, seiring dengan perkembangan ilmu pendukungnya, seperti fisika, kimia, biologi, dan matematika. Di samping itu, teknik kimia mampu memanfaatkan teknologi yang berkembang pada jamannya dengan baik, sehingga muncul pertanyaan apakah teknik

kimia mampu memanfaatkan Teknologi 4.0 di Era Industri 4.0 yang baru mulai beberapa tahun ini ?

Hadirin yang saya mulyakan

Sejarah Teknik Kimia

Pada tahun 1881 George E. Davis berusaha membentuk Masyarakat Insinyur Kimia. Beliau memberi ceramah tentang teknik kimia pertama pada tahun 1887 di Manchester Technical School, sehingga beliau dikenal sebagai insinyur kimia pertama di dunia. Matakuliah dalam Teknik Kimia ditawarkan di M.I.T. ketika seorang Profesor Kimia Industrial, Lewis Mill Norton, merumuskan *Course X-Chemical Engineering* pada tahun 1888 (Antwerpen, 1980). Oleh karena itu, pada tahun 1888 dianggap sebagai tahun kelahiran teknik kimia, yang masih dalam dekade ke dua Revolusi Industri 2.

Semula teknik kimia didominasi tema unit operasi, yang terdiri atas proses-proses khusus yang banyak dijumpai di industri kimia, seperti pemanasan dan pendinginan fluida, distilasi, kristalisasi, dan filtrasi (Cohen, 1996). Dominasi unit operasi berlangsung cukup lama, baru sejak tahun 1935 mulai mengaplikasikan termodinamika dan pengendalian proses, tahun 1945 melibatkan kinetika reaksi dan perancangan proses, dan sejak 1955 makin kuat pada *engineering science* (Antwerpen, 1980), bahkan salah satu jurnal bidang Teknik kimia yang mempunyai reputasi sangat bagus, yaitu Chemical Engineering Science terbit pertama kali pada Oktober 1951. Patut diduga, teknik kimia berperan besar dalam Zaman Integrasi Fisika dan Kimia, atau Zaman “Sains Besar” di akhir Revolusi Industri 2, dengan usaha mengubah teknik kimia yang bersifat kualitatif menjadi kuantitatif, yang dipelopori oleh Neal Amundson, yang kemudian beliau dikenal sebagai Bapak Teknik Kimia Modern.

Di Era Revolusi Industri 2 ini, Era “*Science and Mass Production*”, peran teknik kimia dalam perkembangan ilmu ditandai dengan telah diterbitkannya beberapa buku teks di bidang teknik kimia, seperti Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics oleh Smith and Van Ness (1959), Transport Phenomena oleh Bird et al.(1960), Reaction Kinetics for Chemical Engineers oleh Walas

(1959), and Introduction to Chemical Process Control oleh Perlmutter (1965).

Adapun peran teknik kimia dalam produksi massal nampak dari sifat instrinsiknya yaitu proses kontinyu, yang sangat memperhatikan waktu. Dalam hal ini, dukungan ilmu sangat penting khususnya ilmu terkait dengan laju proses, yang menjadi pokok bahasan dalam buku-buku yang disebutkan di atas. Dengan bekal ilmu di dalamnya, insinyur kimia mampu mengembangkan model yang dapat digunakan untuk merancang dan mengoperasikan industri produksi massal dengan cukup baik. Industri yang dibangun pada masa ini masih banyak rancangan menggunakan angka keamanan yang cukup tinggi (*over-design*) dan dioperasikan dengan sistem kendali analog yang bersifat *stand-alone*. Hal ini disebabkan oleh kemampuan cara dan sarana menghitung yang masih terbatas, dengan menggunakan cara *short-cut*, yang sering harus menggunakan grafik.

Memasuki Revolusi Industri 3, mulai tahun 1969, dengan kemajuan komputer digitalnya, teknik kimia memanfaatkannya dengan baik terutama dalam hal kecepatan dan kapasitas menghitung yang sangat tinggi sehingga penyelesaian persamaan perancangan yang rumit dapat dilakukan dengan cepat dan teliti. Di samping itu, proses dapat dikendalikan secara terpusat dengan desain dan konfigurasi ruang kendali yang kompak dan handal. Bidang yang berkembang pada masa ini adalah metode numerik, pemrograman komputer, dan simulasi; sehingga banyak dihasilkan paket-paket program komputer baik untuk perancangan maupun operasional. Beberapa karya ilmiah mengulas metode penyelesaian secara terinci, seperti Applied Numerical Analysis oleh Gerald dan Wheatley (1970), Numerical Solution of Differential Equations oleh Carnahan and Wilkes (1980), Pemodelan Matematis dan Penyelesaian Numeris dalam Teknik Kimia oleh Sediawan dan Prasetya (1997). Adapun ciri industri yang dibangun pada era ini adalah lebih kompak, lebih terintegrasi, dan lebih efisien dengan tingkat otomatisasi yang tinggi.

SPEEDUP adalah paket program simulasi monumental di awal Era Revolusi Industri 3.0, karya Roger Sargent di bidang *Process System Engineering*, sehingga beliau dikenal sebagai *Founding Father of Process System Engineering* (Stephanopoulos dan Reklaitis, 2011),

yang digunakan secara luas sampai awal tahun 90-an, kemudian disusul oleh Aspen yang masih banyak penggunaannya.

Pada awal perkembangan Aspen Technology, *Artificial Intelligence* (AI) mulai dikembangkan di teknik kimia, telah menghasilkan produk AI, seperti DesignKit.3l dan MODELLA oleh Stephanopoulos dan mahasiswanya. Di samping itu, ada beberapa peristiwa penting terkait AI, di antaranya AIChE sesi AI Pertama di Chicago pada tahun 1985, Kuliah perdana tentang AI di Columbia University pada tahun 1986, Stephanopoulos mempublikasikan sebuah artikel dengan judul “*Artificial Intelligence in Process Engineering*” pada tahun 1986, dan *The first international conference, Intelligent Systems in Process Engineering* di Snowmass, Juli 1995 (Venkatasubramanian, 2018).

Hadirin yang saya hormati

Dari Tradisional ke Desain

Salah satu tugas utama insinyur kimia adalah merancang (desain) pabrik. Definisi epistemologi desain mengacu pada dalil makna desain sebagai alternatif tradisi. Tradisional bergantung kepada evolusi secara spontan, melalui pengujian dan penyesuaian antar generasi; sedangkan desain bergantung kepada kesadaran tanggungjawab terhadap hasil. Tradisional menjadi bukan cara yang dapat diandalkan sehingga harus dikembangkan cara yang lebih terarah dan cepat, yaitu desain. Ketepatan desain untuk memenuhi hasil yang diharapkan sangat tergantung pada pemahaman perancang terhadap proses yang akan dirancang. Namun demikian dalam dunia nyata, yang terjadi adalah gabungan dari ke duanya, tradisional dan desain, yang disebut *Wholeness* (Karabeg, 2012).

Produk industri kimia dibuat melalui serangkaian proses unit operasi yang masing-masing melibatkan sejumlah fenomena secara bersamaan dan atau berurutan, yang terdiri dari fenomena perpindahan dan reaksi kimia. Laju proses ini menentukan biaya produksinya karena laju sangat berkaitan dengan dimensi unit operasi, semakin tinggi laju proses akan semakin kecil unit operasinya (Themelis, 1995). Karena laju proses pada umumnya tergantung jauhnya keadaan dari keadaan

setimbang, maka konsep kesetimbangan sangat perlu untuk dikuasai. Ilmu yang mendasarinya adalah termodinamika. Selain itu, termodinamika juga membahas konsep irreversibilitas yang bermanfaat, antara lain untuk memprediksi kecenderungan proses-proses dan efisiensi energi. Oleh karena itu, insinyur kimia, yang juga dikenal sebagai insinyur proses (*process engineer*), perlu memahami faktor-faktor yang mempengaruhi laju proses tersebut untuk merancang suatu industri kimia, yang bentuk representasi prosesnya disebut model.

Pengembangan Model

Dari Model Mental ke Model Matematik

Tingkat pemahaman terhadap fenomena yang terjadi dalam suatu proses dibedakan mejadi 3, yaitu tidak ada gambaran yang jelas tentang korelasi antar variabel yang terjadi di dalam proses disebut *black-box*, ada sebagian korelasi antar variabel yang dipahami disebut *grey-box*, dan korelasi antar variabel dalam proses dapat dipahami sepenuhnya disebut *white-box*. Pemahaman terhadap suatu proses dapat didekati dengan suatu model. Pendekatan untuk *black-box*, *grey-box*, dan *white-box* berturut-turut dinyatakan dalam model mental, model empirik, dan model matematik (Ljung, 1987). Seiring dengan kemajuan ilmu dan teknologi, pemahaman terhadap proses semakin baik, yang pada gilirannya model matematik semakin dominan. Meskipun di dalam praktek, ketiga model tersebut masih dijumpai.

Di bidang teknik kimia, dominasi model matematik telah dimulai sebelum memasuki Revolusi Industri 3, saat konsep-konsep fundamental sudah mapan. Penyusunan model dari suatu fenomena dan mempelajari sifat-sifatnya merupakan inti ilmu. Kenyataannya, sebagian besar bidang teknik berhadapan dengan bagaimana membuat desain yang baik berdasarkan model matematik. Model matematik juga merupakan instrument untuk simulasi dan prediksi, yang digunakan secara ekstensif dalam semua bidang, termasuk bidang nonteknik seperti ekonomi, ekologi, dan biologi (Ljung, 1987). Model matematik dikembangkan berdasarkan konsep-konsep fundamental dan matematika teknik, karenanya pendidikan teknik kimia sebaiknya subyek-subyek yang bersifat *centered around devices* digeser ke

subyek-subyek yang bersifat *centered around physical principles and mathematical techniques* (Sediawan dan Prasetya, 1997).

Pada dasarnya, model harus dikonstruksi dari data yang teramati dan dipahami prinsip dasarnya. Model mental dinamika mengemudi mobil dikembangkan melalui pengalaman menyetir. Model empirik dibuat dari percobaan atau operasi suatu sistem. Adapun model matematik dikembangkan dengan cara memecah sistem menjadi subsistem, yang sifat-sifatnya dapat dipahami dari pengalaman sebelumnya, yang berupa hukum alam, yang bersifat fundamental, dan hubungan yang sudah mapan, sehingga model matematik bersifat mekanistik. Dalam pemodelan ini, percobaan tidak perlu dilakukan (Ljung, 1987). Dengan semakin mudahnya memperoleh data/informasi, banyak data yang kurang akurat, bahkan bertentangan, sehingga kemampuan untuk justifikasi data mana yang dipakai sebagai landasan juga diperlukan.

Meskipun kemampuan diskripsi matematis atas proses-proses dan komputasi saat ini sudah sangat maju. Namun masih tetap banyak fenomena yang sangat kompleks untuk didiskripsikan secara matematis. karena itu kemampuan menyederhanakan tetap sangat penting. Kemampuan ini sulit didiskripsikan secara sistematis, latihan dan pengalaman dengan penuh kecintaan akan secara alamiah menumbuhkan kemampuan ini. Hal ini menjadikan pemodelan tidak semata-mata bersifat ilmiah tetapi juga bersifat seni, yang mensyaratkan kreatifitas dalam membuat penyederhanaan melalui sejumlah asumsi dan pertimbangan teknik (*chemical engineering judgment*) yang tetap memerlukan naluri. Persyaratan model matematik yang paling penting adalah ketelitian, kerincian, kesahihan, keluwesan, dan tingkat penyelesaian. Namun beberapa persyaratan tersebut bertentangan, misalnya semakin teliti akan semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu, untuk mengatasi dilema ini, model diusahakan sesederhana mungkin dengan batasan tingkat ketelitian yang masih diperkenankan (Sarto, 1991).

Banyak usaha telah dilakukan untuk mendapatkan model matematik yang fleksibel. Fleksibilitas model banyak dilakukan pada perhitungan sifat-sifat bahan. Fredenslund et al. (1980) mengulas perkembangan teknik estimasi sifat-sifat termodinamika untuk

perancangan proses. Pada proses pemisahan, model MESH (*Mass, Equilibrium, Summation, Heat*) diperbaiki dengan model MERH (*Mass, Equilibrium, Rate, Heat*) sehingga perhitungan efisiensi diganti dengan model hubungan perpindahan massa dengan sifat-sifat perpindahannya (Krishnamurthy dan Taylor, 1985). Di bidang termokimia, kalor pembentukan untuk banyak senyawa dapat dihitung dengan mekanika kuantum dengan teliti (Harvey, 2002). Suatu fenomena adakalanya didekati dengan beberapa mekanisme proses, misalnya kinetika proses elektrokoagulasi didekati dengan 4 mekanisme (Syaichurrozi, I. et al., 2019).

Hadirin yang saya hormati

Dari Model Matematik ke Model Simulasi

Setelah model matematik tersusun, cara penyelesaiannya perlu dipersiapkan, baik secara analitik maupun secara numerik. Meskipun metode numeris tidak 100% benar, tetapi lebih banyak digunakan daripada metode analitis, yang sering membutuhkan kemampuan manipulasi matematik yang terlalu *advanced* (Sediawan dan Prasetya, 1997). Kesalahan penyelesaian secara numerik terkait dengan cara pendekatan dan pembulatan akibat perhitungan yang berulang. Adapun kesalahan pendekatan linerisasi terhadap persamaan yang nonlinear terkait dengan kisaran pemberlakukannya, semakin besar kisarannya akan menghasilkan kesalahan yang lebih besar (Gerald dan Wheatly, 1989). Simulasi dinamis *double effect evaporator* pada kondisi sekitar *steady state*, tidak memberikan perbedaan yang nyata antara model nonlinear dengan *state phase model* (Sarto, 1993). Hasil simulasi tidak selalu sesuai dengan realitas sehingga kehati-hatian terhadap pemanfaatan hasil simulasi diperlukan (Kister dan Daniel, 2002).

Pada Era Revolusi Industri 3, ketika kemampuan komputer semakin tinggi, model matematik telah berkembang menjadi model *software* (Ljung, 1987) atau model simulasi. Prosedur teknik dasar model simulasi biasanya melibatkan pembentukan proses ke dalam diagram blok dengan blok-blok terdiri atas elemen-elemen sederhana, yang disebut algoritma, kemudian direkonstruksi menggunakan

komputer. Pada saat ini, domain teknik kimia dalam menjalankan perannya bertumpu pada ke dua model tersebut.

Simulasi proses sekarang diaplikasikan dalam sebagian besar disiplin teknik kimia. Sebagai lanjutan dari model matematik, simulasi proses dapat digunakan untuk menganalisis, memprediksi, menguji, mendeteksi suatu perilaku proses tidak terkait apakah proses sudah ada dalam kenyataan atau belum. Komponen penting pendukung simulator meliputi model, algoritma, perangkat lunak, dan penghubung pemakai (Sarto, 1991). Oleh karena itu, simulasi proses merupakan salah satu instrument sangat penting untuk perancangan proses, penelitian dan pengembangan, perencanaan produksi, optimasi, serta pelatihan dan pendidikan. Penggunaan pemodelan dan simulasi telah menjadi *state of the art* beberapa dekade (Sotudeh-Gharebaagh et al., 1998; Young et al., 2001).

Model simulasi dinamik juga memungkinkan insinyur kimia untuk menjalankan proses kontinyu dengan strategi optimasi, bahkan ketika kondisi *steady state* proses perlu diubah atau karakteristik proses berubah terhadap waktu (*non-stationary*), dengan menggunakan strategi pengendalian yang adaptif (Stepanopoulos, 1984). Saat ini, lebih dari 90 paket model simulasi sudah diaplikasikan, dan salah satu yang terkenal dan sering di-*update*, serta banyak pemakainya adalah Aspen.

Dari Model Simulasi ke Model Cerdas

Dengan menaruh harapan yang tinggi terhadap potensi AI, banyak pihak menyambutnya dengan kegembiraan, yang awalnya terpusat pada *expert systems* (Haskin, 2003). Akan tetapi, kegembiraan tentang *expert system* tidak berlangsung lama karena kesulitan dalam prakteknya, kemudian tertarik teknik AI yang lain, yaitu *neural network*. Ada pergeseran paradigma dari paradigma desain *expert system top-down* ke paradigma desain *neural nets bottom-up*, yang memperoleh pengetahuan secara otomatis dari data yang banyak. Namun demikian, sampai dengan fase ini, masih ada kendala teknologi. Secara umum dapat dikatakan bahwa kemajuan algoritma dan

hardware selama ini, dengan model berdasarkan *first-principles* masih bisa diandalkan untuk menyelesaikan masalah-masalah teknis proses (Venkatasubramanian, 2018).

Hadirin yang saya hormati

Peluang Pengembangan bidang Teknik Kimia di Era Industri 4.0

Data dan Format Masih Bersifat Heterogen

Pengembangan proses dari ide awal ke komisioning pabrik adalah suatu kegiatan kolaboratif yang besar, melibatkan banyak kelompok orang berbeda dari bidang berbeda, datang dari departemen berbeda dalam organisasi, atau bahkan dari perusahaan berbeda (Sargent, 1983), dan dengan ilmu dan ketrampilan berbeda, termasuk dalam pemanfaatan komputer (Cameron et al., 2019; Gani et al., 2020). Keberagaman ini sering menimbulkan masalah terutama terkait dengan penggunaan terminologi dan format informasi yang beragam. Meskipun teknik kimia tergantung pada landasan ilmiah dan teknikal yang masih banyak yang tidak berubah. Akan tetapi, perkembangan baru selalu mengarah pada kreasi alat dan pendekatan baru untuk menyelesaikan masalah sering ditemui saat adaptasi (Uduguma, 2022). Dalam fase desain berbeda, perangkat lunak tertentu digunakan oleh tim proyek untuk menghasilkan dokumen teknik tertentu. Isi berkas dokumen-dokumen dan data yang dihasilkan dari kegiatan-kegiatan dalam fase desain tertentu sangat terkait dan tumpang-tindih, karena ketergantungan yang kuat antara informasi yang dihasilkan. Sehingga pertukaran data antara perangkat berbeda sering terhambat oleh heterogenitasnya sumber data dasar (Embury et al., 2001). Sebagai suatu hasil, kurang-sesuaian perangkat interoperabilitas dan integrasi data merupakan penentu biaya dalam fase desain. Keadaan demikian tidak hanya akan menyebabkan lamanya waktu penyelesaian tetapi juga besarnya kesalahan (Cameron et al., 2022).

Hal ini akan menjadi lebih rumit ketika sejak proses desain di teknik kimia yang tipikal bersifat kreatif dan evolusioner, informasi

awal sering berubah secara substansial. Konsekuensinya, anggota tim yang bekerja di hilir harus mengatur ulang pekerjaan mereka jika kolega dari hulu merubah persyaratan desain atau spesifikasi dengan cara yang tak diduga. Dalam kondisi ini, perubahan teknik hulu dapat menyebabkan kerja ulang hilir secara berarti, yang berpotensi penundaan proyek secara keseluruhan (Eastman, 1980).

Paket Program Bersifat *Single-purpose*

Untuk menangani proses desain yang kompleks secara efisien, dukungan komputer secara efektif diperlukan untuk memungkinkan integrasi dan konsolidasi pendistribusian informasi desain. Jenis dukungan komputer harus memenuhi 2 persyaratan utama : 1) harus menyediakan satu titik akses untuk sumber data bermacam-macam dan heterogen sedemikian sehingga mereka nampak bagi pengguna sebagai seperangkat data tunggal dan homogen, dan 2) harus menentukan relasi antara isi-isi sumber data ini untuk mendeteksi dan rekonsiliasi kemungkinan ketidak-konsistenan informasi yang terdistribusi (Wiesner et al., 2011)

Sayang, sebagian besar program komputer telah dikembangkan secara terpisah sebagai paket program yang berdiri sendiri (*single-purpose*), dan insinyur dihadapkan dengan proses yang memerlukan banyak waktu dari penjelasan data output satu paket ke bentuk yang diperlukan untuk input berikutnya, dan ada beberapa langkah terkait penting saat ini yang belum menggunakan komputer (Sargent, 1983). Keterbatasan alat simulasi proses saat ini adalah tidak bisa mendukung daur-hidup pabrik secara keseluruhan, perluasan fungsinya dapat dilakukan hanya oleh sedikit pengembang *software*, sering berdasarkan pada kode pemrograman lama dan kaya fitur *niche* (de Beer dan Depew, 2021). Meskipun banyak paket simulasi yang sampai saat ini masih banyak pemakainya, seperti Aspen, tidak menjamin akan bertahan lebih lama, terutama memasuki Era Revolusi Industri 4.0.

Pemanfaatan Data yang Belum Optimal.

Hardware baru menyediakan transduser untuk pengukuran dari kisaran variabel proses yang semakin luas. Mikro-elektronik memiliki kinerja handal dan murah, sehingga dapat digunakan untuk membangun sistem pengendalian dan komunikasi dengan akurasi dan integritas yang tinggi, dapat segera melaporkan dan menanggapi aksi tanggap darurat secara otomatis (Sargent, 1983). Dengan alasan ini, teknik kimia telah terbiasa mengakuisisi dan menggunakan sangat banyak data dari banyak sensor untuk memantau dan mengendalikan jauh sebelum istilah *Big Data* mengemuka (Udugama et al., 2020; Venkata-subramanian, 2019). Namun demikian, masih banyak data tersimpan di dalam *Plant Historical Data* yang belum dimanfaatkan secara optimal.

Hadirin yang saya hormati

Industri 4.0 merupakan bagian dari strategi pemanfaatan teknologi tinggi yang memungkinkan industri terintegrasi secara keseluruhan. Industri 4.0 menerapkan konsep *Cyber Physical Systems (CPS)* dan *Internet of Things (IoT)*, yang menggabungkan upaya memperoleh dan mengirimkan informasi *real-time* untuk pengidentifikasian, pengalokasian, pelacakan, pemantauan dan pengoptimasian proses produksi. Aspek terpenting dalam hal ini adalah penanganan begitu banyak data dari sejumlah mesin, proses, produk, dan jasa. Data harus disimpan, dianalisis sebagai dasar untuk pengambilan keputusan, untuk kemudian menjadi tindakan. Keunggulan Industri 4.0 adalah sangat adaptif, fleksibel dan produksi massa yang dapat diatur, koordinasi rantai nilai *real-time* dan optimasi, mengurangi biaya kerumitan dan memasuki model pelayanan dan bisnis. Ada 9 pilar Teknologi Industri 4.0, yaitu sistem *cyber-physical*, *cloud computing*, *Industrial Internet of Thing*, *Augmented Reality*, *Big Data Analytics*, *Cyber Security*, *Advanced Robots*, *3D Printing*, serta *Horizontal and Vertical Integration* (Kumar dan Nayyar, 2020).

Hartarto (2018) pada Sosialisasi Roadmap Implementasi Industry 4.0 di Jakarta mengatakan bahwa “Sejak tahun 2011, kita telah memasuki Industri 4.0, yang ditandai meningkatnya konektivitas, interaksi, dan batas antara manusia, mesin, dan sumber daya lainnya yang semakin konvergen melalui teknologi informasi dan komunikasi”. Beberapa dokumen bukti kesungguhan Pemerintah Republik Indonesia untuk menyambut Era Industri 4.0 telah diterbitkan, di antaranya *Roadmap Making Indonesia 4.0* (2018) dan Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 12 Tahun 2020 tentang pengukuran tingkat kesiapan industri dalam bertransformasi menuju industri 4.0.

Kemenperin telah menyelenggarakan *assessment Indonesia Industry 4.0 Readiness Index* (INDI 4.0) guna mengakselerasi pelaku industri untuk dapat bertransformasi menuju industri 4.0 pada tahun 2019, dan Penganugerahan INDI 4.0 *award* Tahun 2021, selanjutnya diadakan Penandatanganan MoU antara Kemenperin dan Kementerian BUMN, yang bertujuan untuk mendukung program Making BUMN 4.0 dalam mendorong kesiapan BUMN bertransformasi ke industri 4.0. Pada kesempatan MoU tersebut, Menperin memberikan penghargaan kepada PT Pupuk Kaltim sebagai *National Lighthouse* Industri 4.0., yang telah membuktikan bahwa hasil implementasi industri 4.0 memberikan dampak finansial dan operasional secara luar biasa dan menjadi *role model* bagi industri lain untuk melakukan transformasi digital ke implementasi industri 4.0.

Hadirin yang saya mulyakan

Adaptasi Teknik Kimia di Era Industri 4.0

Transformasi Digital

Masalah keberagaman format data dan informasi dapat diatasi jika semua pihak dalam fasa perancangan awal dapat menyetujui model data bersama untuk informasi dalam basis desain, yang disebut basis desain digital. Dengan menggunakan model ini, kita bergerak dari suatu bentuk urutan kerja berbasis dokumen menjadi berbasis data. Ini didasarkan pada standart saat ini dan dalam pengembangan, seperti

ISO/IEC81346, CFIHOS, DEXPI dan ISO 15926 (Kim et al., 2020). Model sendiri diekspresikan menggunakan *semantic web standards* (Hitzler et al., 2012). Pilihan teknologi ini memungkinkan kita menggunakan *reasoning methods* untuk mengecek konsistensi data, persyaratan dan asumsi (Cameron et al., 2022).

Dengan teknologi berbasis data secara prinsip memungkinkan untuk menyusun suatu basis data terintegrasi mencakup setiap fase dari pengembangan proyek secara menyeluruh, setiap kelompok menciptakan, menggunakan atau memodifikasi data sebagai bentuk kontribusinya. Akan tetapi jumlah data yang terlibat akan sangat besar, dan membuat pengelolaan data secara praktis mensyaratkan basis data harus sangat terstruktur (Sargent, 1983).

Upaya Integrasi *Cyber-Physical*

Digital twin adalah membuat model virtual untuk obyek-obyek fisik dalam bentuk digital untuk mensimulasi perilakunya. Dengan *digital twin*, integrasi *cyber-physical*, jembatan antara dunia fisik dan dunia siber, terbuka untuk kegiatan *manufacturing* dengan suatu cara baru untuk membawa ke produksi cerdas dan pengelolaan presisi (Qi, dan Tao, 2018).

Digital twin disusun 3 komponen, yaitu entitas fisik dalam dunia fisik, model virtual dalam dunia virtual, dan koneksi antara antar kedua dunia. Proses operasi fisik dinilai, dianalisis, diprediksi dan dioptimasi dalam bentuk virtual. Setelah simulasi dan optimasi desain produk, serta proses *manufacturing* dan pemeliharaan, *digital twin* memandu proses fisik untuk melakukan solusi optimal. Data *digital twin*, sebagai basis data untuk desain, kualitasnya dapat dilacak. Di samping itu, *digital twin* meningkatkan sinergi antara tahap *life-cycle* produk berbeda dengan pencapaian optimasi iteratif. *Data twin* memiliki keuntungan pada setiap tahap *life-cycle*, yaitu berturut-turut kecepatan evaluasi, penurunan biaya, penurunan waktu, penurunan resiko, dan penurunan *downtime* saat *Conceptual Design, Front End Engineering Design, Detailed Engineering, Start-up*, dan operasi (Qi dan Tao, 2018).

Upaya Pemanfaatan Big data

Dalam beberapa industri, pengambilan keputusan cenderung lebih berdasarkan data dan analisis, dari pada hanya pengalaman. *Big data* menggambarkan jumlah besar kumpulan data terstruktur, semi terstruktur dan tidak terstruktur dari sumber data, yang akan memerlukan terlalu banyak sumberdaya untuk disimpan dan dianalisis. Bagi pengguna data, mereka memberi perhatian lebih ke nilai data daripada kuantitas yang begitu banyak. Sehingga, analisis *big data* juga diartikan sebagai kemampuan memperoleh nilai tersembunyi dan informasi secara cepat dari berbagai macam dan jumlah data yang besar. Isi *big data* sebenarnya realtif sederhana, penekanan pada skala besarnya data dan nilai tersembunyi di dalamnya (Chen, et al., 2014). Melalui analisis *big data* berdasarkan *cloud computing*, *manufacturer* dapat mencari hambatan proses *manufacturing*, menyadari penyebab dan dampak masalah, dan menemukan penyelesaiannya. Sehingga efisiensi proses *manufacturing* dapat ditingkatkan, yang membuat *manufacturing* semakin ramping dan kompetitif. Semua informasi berharga dari *manufacturing big data* sebagai umpan balik ke desain produk, *manufacturing*, dan *MRO (Maintenance, Repair & Overhaul)*. Ini dapat membantu *manufacturing* mencapai perubahan ke *smart manufacturing* (Qi, Q. and Tao, F. , 2018).

Hadirin yang saya hormati

Integrasi Teknik Kimia di Era Industri 4.0

Pemangku kepentingan industri melihat *Digital Twin* sebagai penyusun bangunan untuk transformasi digital proses industri yang paling penting. Sementara simulator yang ada sangat sesuai untuk mensimulasi proses secara akurat, dengan arsitekturnya tidak ideal untuk melayani keseluruhan daur-hidup pabrik dan mendukung transformasi digital (de Beer dan Depew, 2021)

Pendekatan baru simulasi proses yang memungkinkan transformasi teknik proses antara lain pendekatan *platform software*

untuk simulasi proses yang mengganti piranti lunak *single-purpose*, menggabungkan simulasi proses dengan basis data teknik agar memungkinkan kolaborasi insinyur proses dengan disiplin teknik lain dengan membangun *digital twin*, dan membangun alur-kerja cerdas agar memungkinkan rekayasa secara simultan dengan validasi secara terus-menerus. Kolaborasi ini akan berjalan dengan baik ketika didukung oleh operabilitas dan integrasi data dan informasi yang baik (Wiesner, A. et al., 2011).

Software simulasi proses generasi mendatang memerlukan beberapa unsur, yaitu termodinamika teknik kimia yang akurat, pendekatan model yang meliputi kumpulan model untuk berbagai industri dan jenis pabrik, kumpulan model dengan model-model alat proses, suatu *PFID-like interface*, *P&ID-like interface*, desain berorientasi persamaan, kemampuan untuk merubah mode perhitungan. Konsep dan implementasi *Comprehensive Information Base* (CIB) terdiri atas 3 modul dasar : 1) *knowledge base*; 2) lingkungan pengetahuan di luar domain; dan 3) mesin pengambil kesimpulan, yang mengevaluasi model pengetahuan secara berturut-turut (ontologi) agar memberi alasan tentang fakta (Wiesner, et al., 2011).

Sematik Web menawarkan kemampuan untuk melekatkan makna pada data dan mewakili pengetahuan yang terekstrak dari data, sedangkan ontologi adalah makna inti untuk mewakili data, maknanya, dan pengetahuan tentang data pada Semantik Web. Sejumlah ontologi telah dikembangkan, seperti OntoCAPE (Morbach et al., 2007) dan OntoKin (Farazi et al., 2020)

Saat ini industri proses dituntut lebih kompetitif. Batas keuntungan semakin kecil, kesadaran sosial semakin tinggi, serta lebih perhatian pada keselamatan dan dampak lingkungan. Hal ini berimplikasi pada penggunaan model prediktif lebih detail dan realistis, dengan jumlah persyaratan yang semakin banyak, dan peningkatan jumlah persyaratan perhitungan yang besar. Transisi dari layak ke desain optimum adalah mudah, tetapi menjamin operasi layak dalam suatu kisaran kondisi membuat masalah berdimensi tak hingga, dan berhadapan dengan ketidakpastian. Untuk menjawab masalah ini, perlu

pengembangan sistem berbasis komputer yang mengemas kepakaran manusia, yang disebut sistem pakar (Sargent, 1983).

Digitalisasi

Sudah sangat jelas bahwa digitalisasi merupakan salah satu *mega-trends* yang mempengaruhi kerja dan kehidupan dalam banyak hal (Udugama et al., 2021). Perkembangan penciptaan *Internet of Things* (IoT) (Chettri dan Bera, 2020) merubah bagaimana peralatan terhubung dan berinteraksi. Dengan kemudahan akuisisi, penyimpanan dan pengambilan data; dan ketersediaan perangkat keras perhitungan yang sangat kuat; serta dilengkapi dengan perangkat *coding* sederhana seperti Python, maka penyebaran metode *Machine Learning* (ML) dan AI (Stephenson et al., 2020) dapat diperluas cakupan aplikasinya. Dengan digital twin, pemanfaatan asset menjadi lebih baik dengan operasi yang jauh lebih fleksibel sehingga efisiensi akan meningkat (Aharony, 2020). Tiga area teknikal utama yang perlu diperhatikan yaitu bidang digitalisasi yang fokus pada pengembangan model untuk menunjukkan perilaku pabrik secara digital dan sifat lain yang menarik, metodologi berbasis data, dan IoT yang utamanya menghubungkan sensor dan infrastruktur lain yang diperlukan untuk mengoleksi, menyimpan dan mengakses data (Udugama et al., 2022))

Data Science (DS)

Insinyur kimia, khususnya di industri manufaktur, merupakan produsen dan konsumen data, yang mempunyai peran penting untuk memanfaatkan data memverifikasinya dengan teori dasar di bidangnya. Akan tetapi ada data yang tidak dapat diverifikasi berdasarkan teori dasar, sehingga memerlukan ilmu lain, yaitu DS. Algoritma ML memungkinkan komputer untuk belajar pola murni dari data sehingga mereka dapat melakukan tugas tanpa instruksi (Beck et al., 2016).

Data dan informasi dapat berupa data faktual, teori saintifik terkait, dan juga kondisi penggunaan. Salah satu contoh manajemen

data adalah proses penapisan dan pembersihan data dari sumbernya sebelum digunakan (Qi and Tao, 2018). Adalah penting untuk diperhatikan bahwa kemudahan penggunaan *software modern* dapat mengarah pada aplikasi yang tidak tepat, jika teori terkait DS tidak dipahami dengan baik (Beck et al., 2016). Kegagalan menyolok dalam model DS murni, seperti *deep-neural networks*, adalah kekurangan pemahaman dasar pengetahuan, seperti *self-driving car* dan citah memburu kijang (Venkatasubramanian., 2018)

Aplikasi konsep DS memungkinkan komputer untuk meningkatkan kemampuan merancang, metransfer dan menerapkan produk dan proses benar sejak awal (*right-first-time*). Oleh karena itu, data harus dipandang dan dikelola sebagai asset yang bernilai tinggi. Di bidang Teknik kimia, DS diperlukan ketika ingin membuat *software tool* dan menangani *big data*, yang hanya sebagian data dipahami secara teoritis (Piccione, 2019).

Hadirin yang saya mulyakan

Kecerdasan Buatan (AI)

Kemampuan paket simulasi bidang teknik kimia dalam perancangan dan operasional industri kimia sudah sangat meyakinkan. Namun demikian, ada beberapa fungsi penting dalam pengelolaan industri, seperti menduga kesalahan dan analisis potensi bahaya proses, membutuhkan *causal models-based reasoning*, masih di luar cakupan paket simulasi. Konsep dan teknik AI menunjukkan kemampuan *causal models-based reasoning*. Disiplin teknik kimia menjalani transisi yang belum pernah terjadi sebelumnya - bahwa menghadapi tantangan dan peluang yang berarti dalam pemodelan dan pembuatan keputusan yang otomatis, yang didukung oleh pertemuan antara perhitungan yang murah dan kuat dengan komunikasi yang mudah. Salah satu akibat penting dari pertemuan ini adalah perolehan, penggunaan, dan pengelolaan banyak macam data, informasi, dan pengetahuan, sebagai dasar pengambilan keputusan terkait fungsi-fungsi di atas (Venkatasubramanian, 2018)

Kemajuan AI dalam dekade terakhir sangat mengejutkan, dan kendala teknologi sudah dapat diatasi sehingga orang telah mulai percaya dan menerima rekomendasi sistem yang dibantu AI, seperti Google dan Alexa. Perusahaan mulai merubah aliran kerja untuk mengakomodasi proses kerja berbantu AI (*AI-assisted*). Kemajuan ini didukung oleh berkembangnya *software* dengan kinerja algoritma dan lingkungan pemrograman tingkat tinggi seperti MATLAB, Mathematica, dan Python; sehingga waktu pembuatan program dapat dipersingkat dari mingguan menjadi beberapa menit dengan jumlah baris kode yang jauh lebih sedikit. Di samping itu, teknologi komunikasi nirkabel juga berkembang sangat pesat, dan kemampuan pengolahan data yang handal di berbagai bidang; sehingga mendorong kemajuan ML. Jadi kita telah memasuki kondisi “*technology push-market pull*” (Venkatasubramanian, 2018).

Dari Numerik ke Variable dan Struktur Simbolik

Kemajuan konsep dan perangkat AI menyebar luas. Kita memasuki suatu era tranformatif dalam akuisisi, pemodelan, dan penggunaan pengetahuan. Untuk menghargai bagaimana dan dimana AI berkait dengan teknik kimia, seseorang perlu meninjaunya dari perspektif paradigma pemodelan pengetahuan berbeda. Secara konsep, matematika terapan memodelkan hubungan numerik antara variable dan parameter-parameter, pemrograman matematik memodelkan hubungan antara batasan-batasan, AI memodelkan hubungan antara variable simbolik dan struktur simbolik.

AI yang menggunakan pendekatan *bottom-up* (strategi *data-driven*) telah membuatnya jauh lebih mudah untuk menangani berbagai masalah. Namun hal ini belum tentu cocok di bidang teknik kimia, karena teknik ini mensyaratkan data yang banyak, dan sistem teknik kimia dihasilkan oleh hukum fundamental dan prinsip fisika, kimia, dan biologi.

Oleh karena itu, untuk bidang teknik kimia, bahwa banyak, dari yang diperlukan dapat dipenuhi menggunakan *expert system* dan *neural network*. Jadi yang diperlukan adalah mencari cara mengintegrasikan

pengetahuan prinsip pertama dengan model *data-driven* untuk mengembangkan model *hybrid* yang mudah dan handal. Untuk menambah model numerik, diperlukan pemodelan hubungan simbolik antara konsep atau entitas, yaitu ontologi. Untuk itu, Aspen Technology bekerjasama dengan Wood mengantarkan teknologi APM (*asset performance management*) untuk memprediksi dan menentukan pemeliharaan (*Chemical Engineering*, 10 September 2020). Penjelasan kausal berbasis mekanisme merupakan fondasi sains dan teknik. AI *black-box* menarik perhatian karena dapat merusak kepercayaan terhadap model mekanistik. Pendekatan AI *hybrid* menggabungkan pemahaman *first-principles* dengan teknik *data-driven*.

Tantangan besar yang dihadapi bidang teknik kimia adalah perubahan paradigma yang dipegang selama ini yaitu reduksionis (*top down*) menjadi paradigma konstruksionis (*bottom-up*). Pada Abad Sain 21, era paradigma konstruksionis, berangkat dari bagian ke keseluruhan. Pemodelan fenomena *bottom-up* memerlukan arahan fitur penting sebab sifat *teleology-like* sering muncul pada level makroskopik, baik secara eksplisit maupun implisit, bahkan dalam kasus entitas *purpose-free*.

Hal lain yang perlu dipikirkan adalah implikasi aplikasi teknologi 4.0 terhadap profesi dan pendidikan teknik kimia terutama kaitannya dengan peningkatan peran “mesin cerdas” dalam pengambilan keputusan yang selama ini dilakukan oleh manusia.

Hadirin yang saya hormati

Sebelum mengakhiri pidato ini, izinkanlah saya menyimpulkan apa yang telah saya uraikan. Dari waktu ke waktu, kegiatan bidang teknik kimia, termasuk industri kimia, selalu berkembang sesuai perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Oleh karena itu, bidang teknik kimia mempunyai peluang besar untuk mampu adaptasi dan integrasi di Era Industri 4.0.

Sebagai penutup pidato pengukuhan ini, saya mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui

Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, yang telah memberi saya jabatan guru besar dalam bidang Teknik kimia di Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Rektor, Senat Akademik, Majelis Guru Besar, Dekan dan Senat Fakultas Teknik, serta Departemen Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada, yang telah menyetujui pengangkatan saya dalam jabatan guru besar.

Pada kesempatan ini saya ingin memersempahkan terima kasih kepada almarhum kedua orang tua kami, Bapak/Ibu Yatno Sukarto yang telah mengasuh dan mendidik kami. Juga kepada almarhum Mertua kami, Bapak/Ibu Wiro Sularjo atas bimbingannya.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada semua guru saya di SDN Krajan, SMPN Gatak Sukoharjo, dan SMAN 4 Surakarta. Kepada para dosen dan karyawan di Departemen Teknik Kimia Universitas Gadjah, saya haturkan banyak terima kasih. Secara khusus, saya mengucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Ir. Bambang Soehendro, M.Sc., D.E.Sc. dan alm Prof. Dr. Ir. Ida Bagus Agra yang telah banyak memberikan nasihat dan teladan sebagai pendidik. Terima kasih saya sampaikan kepada Prof. Sten Bay Jorgensen atas bimbingan dan arahnya untuk bergabung dalam grup "*Process Design Dynamic and Control*" di Kemiteknik DTH.

Penghargaan dan terima kasih kepada istri saya tercinta, Mulyati, anak-anak kami, Rohmi Arundati, Annisa Ridhowati, dan Karima Fahmawati; menantu kami, Muhammad Hasan Muntaha, Sandi Gunawan, Azka Sinatrya, serta Cucu kami, Arsyila Qari Sinatrya atas pengertian dan kasih sayangnya, sehingga kita bisa berusaha menerima ketentuan-Nya dengan baik, dan *in syaa Allah* membawa kebaikan.

Terakhir, rasa terimakasih saya sampaikan kepada Ibu, bapak, hadirin yang dengan sabar mengikuti pidato pengukuhan ini, serta mohon maaf atas segala kesalahan dan kekhilafan.

Alhamdulillahilahi rabbil'alamin. Wassalamu'alaikum wa rahmatullahi wa barakatuh.

Daftar Pustaka

- Aharony, N., 2020, The impact of digital twin technology on product development and innovation. <http://www.connectivity4ir.co.uk/article/181872/The-impact-of-digital-twin-technology-on-product-development-and-innovation.aspx> .
- Antewerpen, F.J.V., 1980, The Origins of Chemical Engineering (Furter ; History of Chemical Engineering Advances in Chemistry; American Chemical Society: Washington, DC, 1980).
- Beck, D.A.C., Carothers, J.C., Subramanian, V.R., dan Pfaendtner, J., 2016. Data science: accelerating innovation and discovery in chemical engineering. *AIChE J.* 62, 1402–1416.
- Cameron, I.T., Engell, S., Georgakis, C., Asprion, N., Bonvin, D., Gao, F., Gerogiorgis, D.I., Grossmann, I.E., Macchietto, S., Preisig, H.A., dan Young, B.R., 2019. Education in Process Systems Engineering: Why it matters more than ever and how it can be structured. *Comput. Chem. Eng.* 126, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.036>.
- Cameron, D.B., Skogvang, A., Feketec, M., Martinssonc, H., Strandc, M., Castro, M., Helle, K., Gjerver, A., Hansene, C.M., dan Johnsen, K.H., 2022, The Digital Design Basis. Demonstrating a framework to reduce costs and improve quality in early-phase design, *Digital Chemical Engineering*, 2.
- Chen, M., Mao, S. dan Liu, Y., 2014, “Big data: A survey,” *Mobile Netw. Appl.*, vol. 19, no. 2, pp. 171–209.
- Chettri, L., dan Bera, R., 2020, A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. *IEEE Internet of Things J.* 7 (1), 16–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2948888>.
- Cohen C., 1996, The Early History of Chemical Engineering: A Reassessment Author(s): Clive Cohen Source: *The British Journal for the History of Science* , Jun., Vol. 29, No. 2 ,pp. 171-194.

- de Beer , J. dan Cal Depew, 2021, The role of process engineering in the digital transformation, *Computers and Chemical Engineering*, 154
- Eastman, R. M., 1980. Engineering information release prior to final design freeze. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 27, 37.
- Embury, S. M., Brandt, S. M., Robinson, J. S., Sutherland, I., Bisby, F. A., dan Gray, W. A., 2001. Adapting integrity enforcement techniques for data reconciliation. *Information Systems*, 26(8), 657–689
- Farazi, F., Akroyd, J., Mosbach, S., Buerger, P., Nurkowski, Maurin Salamanca, D.M., dan Kraft, M., 2020, *OntoKin: An Ontology for Chemical Kinetic Reaction Mechanisms*, *J. Chem. Inf. Model.* , 60, 108–120.
- Fredlund, A., Rasmussen, P., dan Mollerap, J., 1980, *Thermophysical and Transport Properties for Chemical Process Design*, *Conference on Foundation of Computer Aided Process Design*, Henniker, N.H., pp 1-30.
- Gani, R., Bałdyga, J., Biscans, B., Brunazzi, E., Charpentier, J.-C., Drioli, E., Feise, H., Furlong, A., Van Geem, K.M., de Hemptinne, J.-C., ten Kate, A.J.B., Kontogeorgis, G. M., Manenti, F., Marin, G.B., Mansouri, S.S., Piccione, P.M., Pova, A., Rodrigo, M. A., Sarup, B., dan Woodley, J.M., 2020. A multi-layered view of chemical and biochemical engineering. *Chem. Eng. Res. Des.* 155, A133–A145. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.01.008>.
- Gerald, C.F. dan Wheatley, 1989, “*Applied Numerical Analysis*”, Addison-Wesley Publishing Company, Reading
- Harper, J.I., 1954, “*Chemical Engineering in Practice*”, Reinhold Publishing Corp., New York.
- Harvey, A., H., dan Laesecke, A., 2002, *Fluid Properties and New Technologies: Connecting Design with Reality*, CEP, www.cepmagazine.org, pp. 34-41.

- Haskin D. 2003, “Years after hype, ‘expert systems’ paying off for some”, *Datamation*.
- Hitzler, P., Krötzch, M., Parsia, B., Patel-Schneider, P. F., dan Rudolph, S., 2012. *OWL 2 Web Ontology Language Primer (Second Edition)*.
- Karabeg, D., 2012, *Design Epistemology, Information*, 3, 621-634; doi:10.3390/info3040621
- Kister, H.Z, dan Daniel, F., 2002, Can We Believe the Simulation Results?, *CEP*, www.cepmagazine.org., 52-59
- Krishnamurthy, R. and Taylor, R., 1985, “Nonequilibrium Processes”, *Chemical Engineering*, 31, 3, pp 449.
- Kumar, A., dan Nayyar, A., 2020, *si3 -Industry: A Sustainable, Intelligent, Innovative, Internet-of-Things Industry*, <https://www.researchgate.net/publication/33760525>.
- Ljung, 1987, “System Identification : Theory for the User”, Prentice-Hall, New Jersey.
- Morbach, J., Yang, A., dan Marquardt, W., 2007, *OntoCAPE—A large-scale ontology for chemical process engineering, Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20, 147–161.
- Piccione, P.M., 2019, *Realistic interplays between data science and chemical engineering in the first quarter of the 21st century: Facts and a vision, Chemical Engineering Research and Design*, 147, 668–675
- Qi, Q., dan Tao, F., 2018. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access* 6, 3585–3593.
- Sargent, 1983, *Computers in Chemical Engineering, Plenary Lecture A.I.Ch.E. Diamond Jubilee Meeting Washington D.C.*
- Sarto, 1991, *Simulasi Proses Kimia dengan Bantuan Komputer, Media Teknik, Edisi Khusus Tahun XII, Fakultas Teknik UGM*, 92-97.
- Sarto, 1993, *Analisis Perilaku Double Effect Evaporator melalui Model Matematik, Media Teknik, no 2., Fakultas Teknik UGM*, pp. 108-120

- Sediawan, W.B., dan Prasetya, A., 1997, *Pemodelan Matematis dan Penyelesaian Numeris dalam Teknik Kimia*, Penerbit Andi, Yogyakarta
- Sotudeh-Gharebaagh, R., Legros, R., Chaouki, J., dan Paris, J., 1998. Simulation of circulating fluidized bed reactors using ASPEN PLUS. *Fuel* 77 (4), 327–337. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00211-1).
- Stephanopoulos, G. dan Reklaitis, G., 2011, *Process systems engineering: From Solvay to modern bio- and nanotechnology. A history of development, successes and prospects for the future*, *Chemical Engineering Science*, 66, pp. 4272-4306
- Stephanopoulos, G., 1984, *Chemical Process Control : An Introduction to Theory and Practice*, Prentice-Hall International, Inc., London
- Stephenson, M., Renz, J., dan Ge, X., 2020. The computational complexity of Angry Birds. *Artificial Intelligence* 280, 103232. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2019.103232>.
- Syaichurrozi, I. , Sarto, S., Sediawan, W.B., dan Hidayat, M., 2020, Mechanistic models of electrocoagulation kinetics of pollutant removal in vinasse waste: Effect of voltage, *Journal of Water Process Engineering*, 36.
- Themelis, N.J., 1995, *Transport and Chemical Rate Phenomena*, Gordon and Breach Publishers, New York
- Udugama, I.A., Christoph Bayer , C., Saeid Baroutian, S., Gernaey, K.V., Yu, W., dan Young, B. R., 2022, The Digital Design Basis. Demonstrating a framework to reduce costs and improve quality in early-phase design, *Digital Chemical Engineering*, 2, 2022, 100015
- Udugama, I.A., Lopez, P.C., Gargalo, C.L., Li, X., Bayer, C., dan Gernaey, K.V., 2021. Digital Twin in biomanufacturing: challenges and opportunities towards its implementation. *Syst. Microbiol. Biomanufact.* <https://doi.org/10.1007/s43393-021-00024-0>.

- Venkatasubramanian, V., 2018, The Promise of Artificial Intelligence in Chemical Engineering: Is It Here, Finally; AIChE Journal
- Wiesner, A., Morbach, J., dan Marquardt, W., 2011, Information integration in chemical process engineering based on semantic technologies. *Computers and Chemical Engineering*, 35, 692-708
- Young, B.R., Mahoney, D.P., dan Svrcek, W.Y., 2001. Real-time computer simulation workshops for the process control education of undergraduate chemical engineers. *Comput. Appl. Eng. Educ.* 9 (1), 57–62. <https://doi.org/10.1002/cae.1006>.

BIODATA



Nama : Prof.Dr. Ir. Sarto, M.Sc.

Tempat, Tgl. Lahir : Sukoharjo, 8 Juli 1960

NIP : 19600708 198601 1 001

Pangkat/Gol. : Pembina Tingkat I, IV/b

Jabatan : Guru Besar, 1 Mei 2022

Alamat Kantor : Departemen Teknik Kimia
FT UGM, Jln. Grafika 2,
Yogyakarta, 55281

Email : sarto@ugm.ac.id

Keluarga : 1. Mulyati (Istri)
2. Rohmi Arundati (Anak)
3. Annisa Ridhowati (Anak)
4. Karima Fahmawati (Anak)
5. Muhammad Hasan
Munthaha (menantu)
6. Sandi Gunawan (menantu)
7. Azka Sinatrya (menantu)
8. Arsyila Qari Sinatrya (Cucu)

Alamat Rumah : Sedan no 75 RT 05 RW 34
Sariharjo Ngaglik Sleman

Riwayat Pendidikan

- 1985 : S1 Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UGM
- 1990 : S2 Technical University Denmark
- 2001 : S3 UGM

Asosiasi Profesional : PII dan IChemE

Riwayat Pekerjaan :

- 1986–Sekarang : Dosen Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
- 2003–2011 : Pembantu Pengurus Jurusan II Bidang Kepegawaian & Keuangan, Jurusan Teknik Kimia FT UGM
- 2011–2017 : Sekretaris Jurusan Teknik Kimia FT UGM
- 2016–2020 : Kepala Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalis FT UGM
- 2017–2020 : Ketua Program Studi Doktor Teknik Kimia FT UGM

Publikasi Ilmiah (tiga tahun terakhir)

1. Iqbal Syaichurrozi, Sarto Sarto,*, Wahyudi Budi Sediawan, Muslihin Hidayat, 2022, Experiment and kinetic analysis of the effect of agitation speed on electrocoagulation process for the treatment of vinasse, Journal of Water Process Engineering.
2. Kharisma, A.D., Yumechris, A., Sarto, Cahyanto, M.N., 2022, Effect of hydrogen peroxide on biohydrogen production from melon fruit (Cucumis

- melo l.) waste by anaerobic digestion microbial community, International Journal of Renewable Energy Development.
3. Listyaningrum, Nur Baiti; Azis, Muhammad Mufti Sarto^a;Rosdi, Anis Nurdhiani^b; Harun, Mohd Razif, 2021, Kinetic study of subcritical water extraction of carbohydrate from microalgae nannochloropsis sp., Asean Journal of Chemical Engineering.
 4. Melly Mellyanawaty; Sumire Nakakoji; Masahiro Tatara; Lisendra Marbelia; Sarto; Irfan Dwidya Prijambada,; Wiratni; Yoshiyuki Ueno , 2021, Enricment of Thermophilic Methanogenic Mocroflora from Mesophilic Waste Activated Sludge for Anaerobic Digestion of Garbage Slurry, Journal of Bioscience and Bioengineering.
 5. Iqbal Syaichurrozi, Sarto Sarto* , Wahyudi Budi Sediawan , Muslikhin Hidayat, 2021, The New Mechanistic Model to Illustrate the Complex Phenomena in Electro-coagulation Process of Vinasse, Polish Journal of Environmental Studies.
 6. Iqbal Syaichurrozi, Sarto Sarto* , Wahyudi Budi Sediawan b , Muslikhin Hidayat, 2021, Effect of Current and Initial pH on Electrocoagulation in Treating the Distillery Spent Wash with Very High Pollutant Content, Water.
 7. Prasasti, L., Melyta, D., Sarto, Prasetya, A., 2021, Subsurface flow constructed wetland model for phytoremediation of chromium from tannery wastewater using Echinodorus palaefolius, IPO Conference Series : Earth and Environmental Science.

8. Astrilia Damayanti Astrilia, Sarto; Wahyudi Budi Sediawan, 2020, Biohydrogen production by reusing immobilized mixed culture in batch system, International Journal of Renewable Energy Development.
9. Iqbal Syaichurrozi, Sarto Sarto* , Wahyudi Budi Sediawan, Muslikhin Hidayat, 2020, Mechanistic models of electrocoagulation kinetics of pollutant removal invinasse waste: Effect of voltage, Journal of Water Process Engineering, 36Mufti Azis, Muhammad Mufti Azis, Kristanto, Jonas, Sarto, 2020, Dynamic simulation of insulin-glucose interaction in type 1 diabetes with MATLAB Simulink, IPO Conference Series : Materials Science and Engineering.
10. Mustakim Z. Purwaningtyas F.Y. Leksono E.B. Sarto Prasetya A, 2020, Optimization condition of fluoride adsorption using activated clay, IPO Conference Series : Materials Science and Engineering.
11. Iqbal Syaichurrozi, Sarto Sarto* , Wahyudi Budi Sediawan, Muslikhin Hidayat, 2020, Mechanistic model of electrocoagulation process for treating vinasse waste: Effect of initial pH, Journal of Environmental Chemical Engineering.
12. Astrilia Damayanti , Sarto, Wahyudi Budi Sediawan, 2020, Biohydrogen Production by Reusing Immobilized Mixed Culture in Batch System, Int Journal of Renewable Energy Development.
13. Rismiyati Damayanti; Silwina Bayonita; Wiratni, Sarto, I Wayan Mustika; Chandra Wahyu Purnomo,, 2020 The Study of Immobilized Media and Ni Ion Addition Effects on COD Removal of POME Using Anaerobic Filter Reactor, Waste and Biomass Valorization.